LES INDISPENSABLES
SCIENCES ET AVENIR

ANTOINE PETIT
Président-directeur général du CNRS
« La recherche concerne plus que jamais l'ensemble de la société »

L'état de la science en 2024

CE QU'IL FAUT SAVOIR

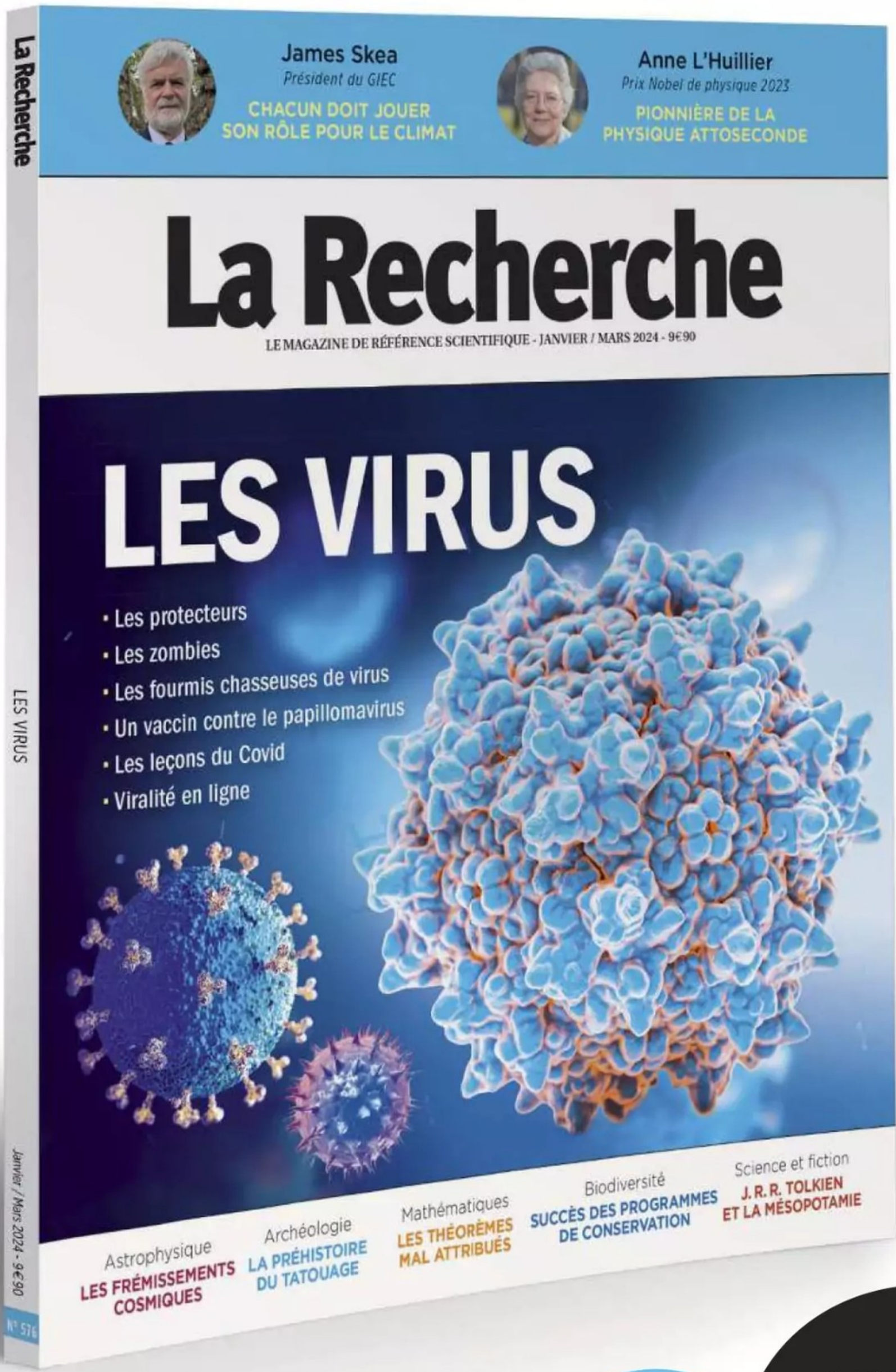
ARN • MICROBIOTE
PREMIÈRES GALAXIES • HYDROGÈNE
CHANGEMENT CLIMATIQUE • PRÉHISTOIRE
SEXE ET GENRE...

INTELLIGENCE ARTIFICIELLE De la reconnaissance faciale à Chat-GPT, comment les algorithmes sont devenus incontournables

NUMÉRO SPÉCIAL 216 JANVIER/MARS 2024 - ALLEMAGNE 8.00 € / BELGIQUE : 6.10€ / GRÈCE : 6.20€ / ESPAGNE : 6.20 € / ITALIE : 6.20 € / DOM: 6.20€ / LUXEMBOURG : 6.10 € / PORTUGAL CONT : 6.20 € / TOM S : 860 XPF / TOM AVION : 1600 XPF / SUISSE : 9.80 CHF / TUNISIE : 10 TND / MAROC : 60 MAD / CANADA : 9.49 $CAD
GETTY IMAGES, QUENTIN HOUDAS/LEEXTRA POUR SCIENCES ET AVENIR
L 13667 - 216 H - F: 5,90 € - RD

29 SCIENTIFIQUES PARTICIPENT À CE NUMÉRO

La Recherche
LE MAGAZINE DE RÉFÉRENCE SCIENTIFIQUE



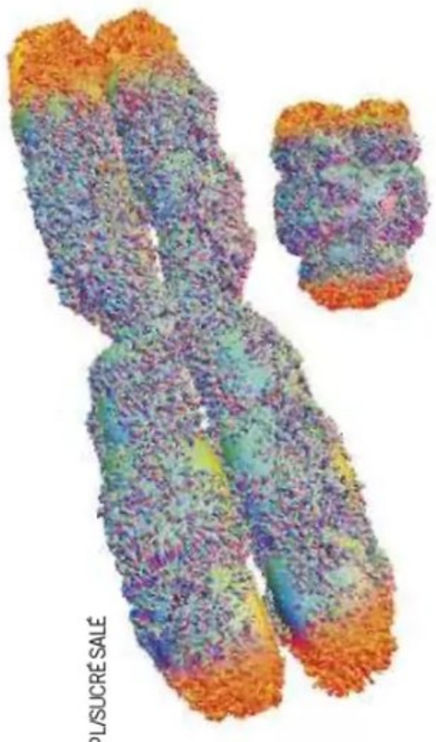
Chez votre marchand de journaux

148 pages
MAGAZINE-LIVRE
Trimestriel

Sommaire

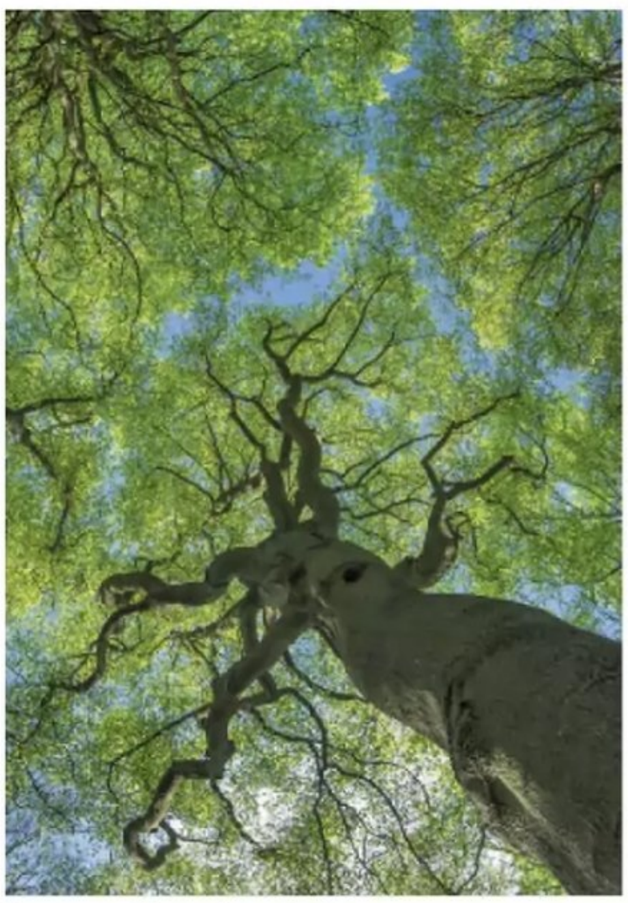
SHUTTERSTOCK

L'IA en révolution permanente
P. 64



SPL/SUCRÉ SALÉ

Quel est le sexe des chercheurs ? P. 26



WILLI ROLFES/BIA/MINDEN PICTURES/BIOSPHOTO

Incroyables vivants ! P. 60

CHRISTOPHE LEPETIT

L'humain, victime et responsable des zoonoses P. 53

SAHAR N. SALEEM, SABAH ABD EL-RAZEK SEDDIK, MAHMOUD EL-HALWAGY

Révéler l'invisible, une affaire de techniques
P. 22

5 **Édito**

6 RENCONTRE
Antoine Petit
« Nous avons vocation à appliquer la recherche que nous produisons »

10 REPÈRES
Les mots de la décennie

14 L'HUMANITÉ REVUE ET CORRIGÉE

16 Le nouvel art de faire parler les fossiles

21 **INTERVIEW Dominique Garcia**
« Toute la France est devenue un site archéologique »

22 Révéler l'invisible, une affaire de techniques

24 La dynamique du génome

26 Quel est le sexe des chercheurs ?

30 EN BREF... L' HUMANITÉ

32 UN UNIVERS REDESSINÉ

34 Au plus près du Big Bang avec le James-Webb

38 **INTERVIEW Françoise Combes**
« La Relativité générale pourrait être modifiée »

39 EN BREF... L'UNIVERS

42 EN IMAGES
Univers : vers l'inconnu et au-delà

44 UNE PLANÈTE À PROTÉGER

46 La sobriété, une idée en pleine croissance

50 On ne pourra plus dire qu'on ne savait pas !

53 L'humain, victime et responsable des zoonoses

56 **INTERVIEW Stéphanie Ruphy**
« Un article frauduleux peut avoir un impact durable sur la société »

58 EN BREF... LA PLANÈTE

60 EN IMAGES
Incroyables vivants !

62 DES RAISONS D'ESPÉRER

64 L'IA en révolution permanente

69 **INTERVIEW Mathieu Corteel**
« Face aux machines, l'humain subit une sorte de dévaluation »

70 L'ARN, un incroyable couteau suisse médical

73 EN BREF... LA SANTÉ

76 CRISPR-Cas9 : coupure à vif dans le vivant

78 EN BREF... LE CERVEAU

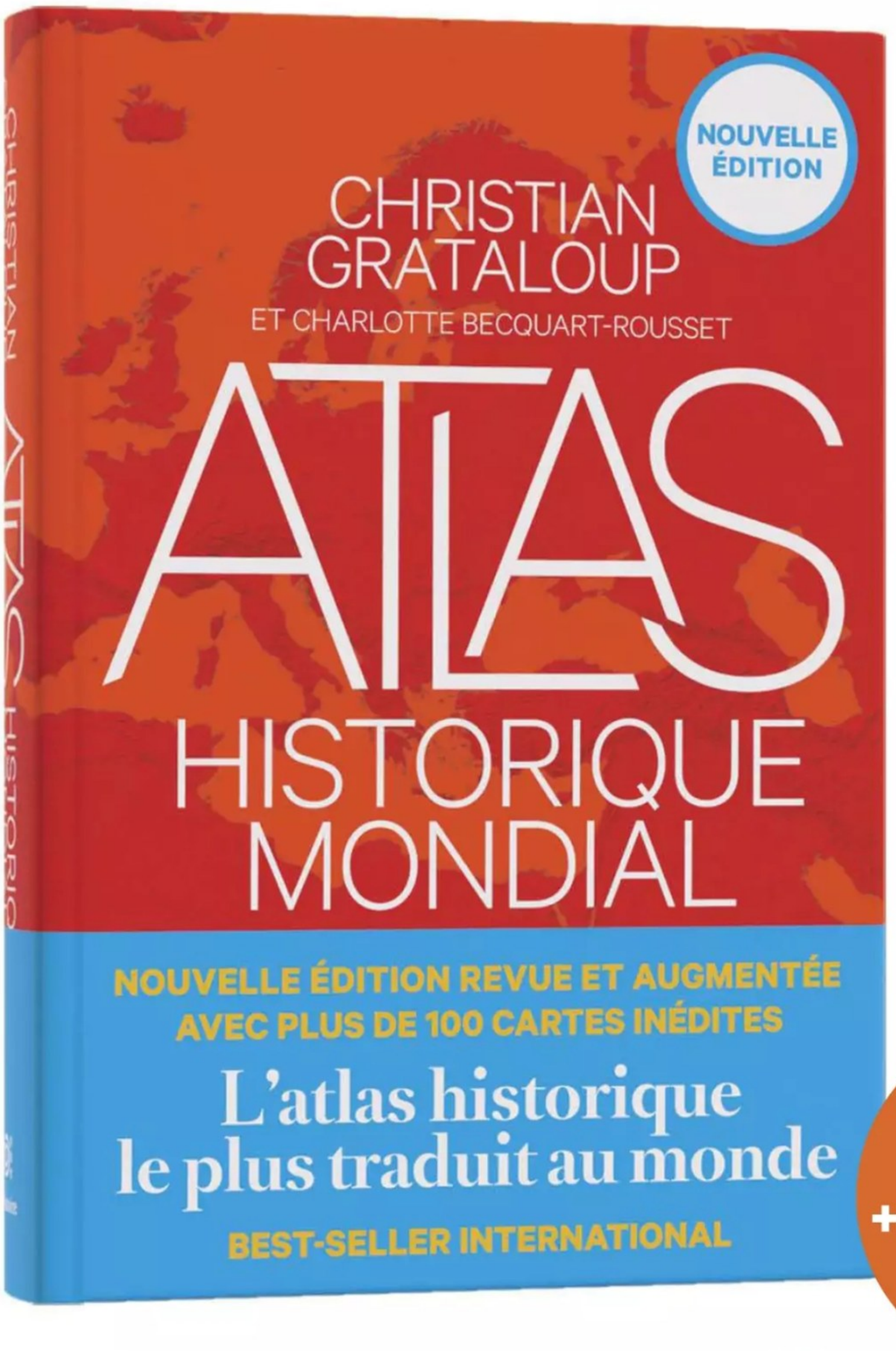
80 JEUX

82 SOLUTIONS DES JEUX

«On ne peut pas comprendre le monde sans le voir.»

Erik Orsenna

de l'Académie française



«Une indispensable synthèse cartographique de l'histoire du monde.»

Le Monde

Une création originale L'Histoire Les Arènes

LES INDISPENSABLES
SCIENCES ET AVENIR

NUMÉRO SPÉCIAL
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.01.
redaction@sciencesetavenir.fr

Directrice éditoriale
Dominique LEGLU 56.02
Rédacteur en chef Sciences et Avenir
Mathieu NOWAK 56.38
Rédacteur en chef La Recherche
Philippe PAJOT - 01.70.98.19.29
Rédacteur en chef digital Olivier LASCAR 56.15

Rédaction en chef hors-série Vincent REA 56.35
avec Florence LEROY 56.36
Directrice artistique Thalia STANLEY 56.21
Photo-iconographie Andreina DE BEI
(rédactrice en chef adjointe) 56.31
Isabelle TIRANT 56.32
Documentation Astrid SAINT AUGUSTE 56.48
Collaboratrice Isabelle do O'GOMES
Ont collaboré à ce numéro :
Grégoire ADER, Jacques-Olivier BARUCH,
Riva BRINET-SPIESSER, Loïc CHAUVEAU,
Yann CHAVANCE, Marine CYGLER, Sara DE LACERDA,
Denis DELBECQ, Caroline DEPECKER, Kamil FADEL,
François FOLLIET, Nicolas GUTIERREZ C.,
Jean-François HAÏT, Valérie HANDWEILER,
Marie PARRA, Éliane PATRIARCA,
William ROWE-PIRRA, Vahé TER MINASSIAN,
Marie-Laure THÉODULE, Pierre VANDEGINSTE,
Agnès VERNET

Publicité MediaObs 44, rue Notre-Dame-des-Victoires
75002 Paris Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79.
Courriel : l'initiale du prénom puis nom suivi de @
mediaobs.com
Directrice générale Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70
assistée de Marie-Noëlle MAGGI - 01.44.88.93.70
Directeur de publicité Emmanuel LALA - 01.44.88.89.28
Exécution Cédric AUBRY - 01.44.88.89.05
Administration des ventes Catherine FERNANDES
01.44.88.89.20
Directeur commercial Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
Responsable des abonnements Lina QUACH
01.55.35.56.63

Les Éditions Croque Futur
Président, directeur de la publication
Claude PERDRIEL
Directeur général Philippe MENAT
Directeur éditorial Maurice SZAFRAN
Secrétaire général Jean-Claude ROSSIGNOL

Abonnements et anciens numéros : 01.55.56.71.48
45, avenue du Général Leclerc
60643 Chantilly Cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Les abonnements et réabonnements doivent être adressés à Sciences et Avenir, service Abonnement
45 avenue du Général Leclerc 60643, Chantilly Cedex.
Tél. : 01.55.56.71.48.
Tarif des abonnements : France,
1 an simple (12 numéros) : 35 €.
1 an complet (12 numéros + 4 hors-série) : 48 €.
Tarifs pour les pays étrangers sur demande.
Multimédia : Sciences et Avenir, 41 bis avenue Bosquet, 75007 Paris. Tél : 01.55.35.56.00.
Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec Sciences et Avenir, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement.
Copyright Sciences et Avenir.
Commission paritaire n° 0620K79712.
Distribué par MLP.

PEFC 10-31-1557
Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
pefc-france.org

Origine du papier : Allemagne
Taux de fibres recyclées : 0%
Eutrophisation : PTot = 0,018 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Roto France Impression, certifié PEFC

ACPM DIFFUSION

Édito

FRANÇOIS GUÉNET/DIVERGENCE MAGES

Rembobinons !

Ce qu'il faut savoir ». Derrière ce titre à l'impérativité assumée se cache un florilège des plus grandes avancées scientifiques de la décennie. Pour démarrer l'année 2024, nous avons souhaité faire un état de l'art, avec la volonté de revenir ensemble sur ces épisodes majeurs et d'en rappeler les enjeux. En un mot, de rembobiner.

Car il s'en est passé de belles depuis 2014. Souvenez-vous. On a détecté des océans dans le Système solaire et des ondes gravitationnelles déferlant de l'Univers lointain ; photographié non pas un, mais deux trous noirs ; lu (dans l'ADN ancien) que Sapiens et Neandertal se sont croisés au propre comme au figuré, et qu'Ötzi était un petit chauve à la peau mate ; inventé des techniques capables de réparer le génome, de restaurer la vision d'un patient aveugle et de rendre un paraplégique maître de ses mouvements. Oui, la science fait des miracles.

Comment ? Nous avons posé la question à Antoine Petit, à la tête du CNRS et de ses 28 000 scientifiques depuis six ans. Vous découvrirez sa réponse dès la page suivante, mais je vous en livre ici deux éléments. Un : nombre de ces avancées sont le fruit d'un travail de plusieurs décennies – voyez l'ARN messager, sur lequel les premiers travaux remontent aux années 1960. La recherche s'inscrit dans le temps long, ce qui ne va pas sans volontarisme politique ni budgets ambitieux. Et deux : il est indispensable, aujourd'hui plus qu'hier, d'unir les compétences et les disciplines. « Tout seul on va plus vite, ensemble on va plus loin », dit le proverbe… Et l'intelligence artificielle promet d'accélérer le mouvement. La recherche fondamentale n'est pas une affaire de savants fous bidouillant dans leur coin, nous dit en substance le patron du CNRS. Les crises que nous traversons nous le rappellent : elle concerne plus que jamais la société tout entière. On l'a vu avec le covid, on le voit avec le climat. À ce propos, cette décennie prolifique a vu naître un nouveau champ de recherche : la science de l'attribution. Avis aux sceptiques ! Les climatologues disposent désormais d'instruments permettant d'établir formellement le lien entre événements extrêmes et changement climatique – autrement dit, de prouver que les activités humaines et leurs émissions mortifères augmentent la fréquence et l'intensité des canicules et des tempêtes. De quoi convaincre nos gouvernants ? Hélas. En termes de sobriété, les grands remèdes semblent encore loin des grands mots. Et pourtant : *« La technologie ne suffira pas à faire face à l'urgence climatique »*, dixit l'Académie des… technologies. Cette sobriété désormais sur toutes les lèvres doit guider non seulement nos gestes quotidiens, mais aussi les politiques de recherche et d'innovation vers un horizon durable. Il y a probablement là un gisement de découvertes. Celles des dix ans à venir ?

« Il ne faut être ni optimiste, ni pessimiste, mais déterminé. » Ainsi parlait Hubert Reeves, toujours entre ciel et terre. Un sage qui a allumé notre curiosité, et pendant tant d'années entretenu la flamme… avant de disparaître en octobre dernier. *« Peut-être qu'on va garder la Terre habitable. Peut-être même qu'on va la garder agréable. »*

VINCENT REA

Rencontre

ANTOINE PETIT

Président-directeur général du CNRS, professeur des universités

« Nous avons vocation à appliquer la recherche que nous produisons »

Distinguer science fondamentale et appliquée est une erreur, affirme le patron du CNRS. Pour répondre aux défis des décennies à venir, il faut miser sur l'interdisciplinarité entre toutes les sciences, y compris humaines, et sur une coopération accrue avec les industriels.

Dans ce numéro, nous faisons un point sur les derniers progrès de la science. Quelles seraient selon vous les plus grandes découvertes de la décennie ?

Les grandes découvertes « ponctuelles », au fond, sont rares… Les ciseaux moléculaires Crispr-Cas9 sont l'exception. Certes, nous avons assisté à des événements spectaculaires : la première photo d'un trou noir, la confirmation de l'existence des ondes gravitationnelles… mais je ne suis pas sûr que ce soit les plus importants. Le poids formidable pris par le *deep learning*, l'approche One Health sont à mon sens des faits majeurs. Mais ce n'est pas, pour prendre ce dernier exemple, parce que quelqu'un, un beau matin, s'est dit : « Tiens, au fait, il y a un lien entre la santé humaine et celle des animaux et des écosystèmes. »

Vous croyez plus à la recherche collaborative qu'aux génies solitaires ?

La recherche est un curieux mélange de coopération et de compétition. Il ne faut pas nier cette double dimension, même si la souligner m'a plusieurs fois valu des remontrances. Le chercheur a envie d'être le premier – avec d'autres, peu importe, mais le premier. Et d'avoir les moyens d'y parvenir. Et un bon chercheur souhaitera toujours collaborer avec les meilleurs. Cela m'évoque un proverbe africain : tout seul, on va plus vite, ensemble, on va plus loin.

C'est une ode à la pluridisciplinarité…

On a besoin de disciplines fortes, il ne faut pas l'oublier. Mais il est vrai que les réponses aux grands enjeux sociétaux ou aux questions posées par le secteur industriel ne se posent jamais en termes disciplinaires. Il est indispensable de faire travailler ensemble des gens de disciplines différentes. Par exemple, un sujet crucial comme le traitement de volumes gigantesques de data nécessite des chercheurs et chercheuses compétents en gestion des données, mais aussi dans le champ disciplinaire dont ces données sont issues. Si vous fournissez des données astronomiques – ou biologiques, etc. – à un *data scientist*, il ne saura pas quoi en faire, à part les traiter de façon théorique. L'enjeu est de trouver le bon équilibre avec les spécialistes du domaine qui, seuls, ne peuvent exploiter au mieux ces données. Autre exemple, celui de la santé. C'est de la biologie, de la chimie, de l'imagerie, des données, des modèles mathématiques, des sciences humaines et sociales… Le fait de réunir toutes ces compétences au sein du CNRS est un vrai plus pour la production de connaissances et l'intérêt général.

Justement, comment fait-on travailler ensemble les scientifiques ?

C'est une difficulté ! Le CNRS que je dirige emploie 28 000 scientifiques répartis en dix instituts. Parmi ces derniers, certains sont très disciplinaires – les maths, la chimie… – d'autres moins : l'écologie et l'environnement, Terre et Univers… Et il existe de multiples sciences humaines et sociales. Notre rôle est, précisément, d'inviter les instituts à travailler entre eux. Et cela marche plutôt bien. Non pas en faisant de la théorie, en disant par exemple : « il faut absolument que

> **« La recherche est un mélange de coopération et de compétition. Un bon chercheur souhaitera toujours collaborer avec les meilleurs**

ANTOINE PETIT

Agrégé de mathématiques et docteur en informatique, spécialiste des méthodes formelles, il a dirigé l'Institut national de recherche en informatique et en automatique (Inria) de 2014 à sa nomination à la tête du CNRS, en janvier 2018.

les chimistes travaillent avec les *data scientists* ». Mais en posant la question : comment trouver de nouvelles molécules ? Si vous expliquez à des *data scientists* que cela peut nécessiter des techniques d'intelligence artificielle, cela les passionne. Autant que les chimistes, qui vont inventer ainsi de nouveaux paradigmes.

Quels sont aujourd'hui les enjeux majeurs pour le CNRS ?
Incontestablement l'attractivité. Au CNRS, nous sommes très contents d'accueillir un grand nombre de scientifiques internationaux, environ un tiers de nos nouveaux personnels de recherche permanents. À ce sujet, on ne peut pas prôner la mobilité quand cela nous arrange, et se plaindre quand des Français partent à l'étranger. Les gens font un, deux, parfois plus, postdoctorats à l'étranger et se rendent compte des conditions qu'on leur offre. Ils comparent…
Comment faire, donc, pour rester un grand pays scientifique ? Avec cette difficulté qui est que les décisions que nous prenons – ou non – aujourd'hui auront un impact dans cinq ou dix ans… En mathématiques, par exemple, le nombre de postes de professeurs d'université offerts au recrutement a été divisé par deux en dix ans. La probabilité qu'on ait autant de médailles Fields dans dix ou quinze ans est ainsi loin d'être garantie.

C'est un problème de crédits ?
Il y a un indicateur auquel je me réfère régulièrement : la DIRD, la dépense intérieure de recherche et développement. Nous sommes à 2,2 % du PIB… comme en 1995. Dans le même temps, les Allemands sont passés de 2,1 % à plus de 3 %, la Chine de 0,6 à 2,4. Et je ne parle même pas d'Israël, de Taïwan ou de la Corée du Sud, qui sont à plus de 4 %. Je ne dis pas cela pour demander que l'État abonde seul les crédits : on en est grosso modo à 0,78 % de public et 1,43 % de privé. Même si l'on passait à 1 % côté public, on serait très loin de ces pays. C'est une question qu'on devrait se poser collectivement : comment fait-on pour augmenter l'investissement en R&D en France ?

Les hommes et femmes politiques ont-ils compris l'enjeu ?
La période est contrastée. Il y a un intérêt très fort, une meilleure compréhension de l'importance de la ◆◆◆

◆◆◆ recherche fondamentale. Quand on explique aux politiques ou aux citoyens que la recherche sur l'ARN messager, qui a permis de proposer rapidement des vaccins efficaces, remonte à François Jacob et Jacques Monod, au début des années 1960, ils comprennent que notre quotidien est impacté par des travaux de recherche fondamentale entrepris il y a plusieurs décennies. Et le discours a changé. On entend désormais que la réindustrialisation de la France doit s'appuyer sur la science. Cela va-t-il se traduire en actes? Il faut vraiment l'espérer, mais c'est une autre histoire.

Que proposez-vous ?
Selon moi, il faut discuter avec les acteurs privés pour les inciter à investir, et comprendre pourquoi ils ne le font pas plus. On ne peut pas les forcer s'ils n'en ont pas l'intérêt. Et puis, côté public, penser qu'on va faire aussi bien que les autres pays en investissant beaucoup moins n'est pas complètement satisfaisant. C'est un leurre.

Vous parliez des acteurs privés. Mais le CNRS n'est-il pas spécialisé dans la recherche fondamentale ?
Il n'y a pas plusieurs types de recherche. Au CNRS, nous avons vocation à appliquer la recherche que nous produisons. Par exemple, sur le climat, nous faisons de la recherche pour comprendre, et aussi pour proposer des solutions. Par ailleurs, il y a eu une vraie inflexion au cours des dix ou vingt dernières années: il n'est plus pertinent d'opposer « travailler avec des industriels » et « faire de la recherche fondamentale ». Aujourd'hui, au CNRS, nous avons 250 laboratoires communs avec les industriels, grands ou petits, dans lesquels nous faisons de la recherche fondamentale, mais sur des questions qu'ils nous ont posées. Le fait pour un chercheur ou une chercheuse de dire qu'il ou elle travaille sur des sujets fondamentaux qui peuvent intéresser les industriels est plutôt un plus aujourd'hui. Et il y a des exemples très concrets. Il y a quelques années, nous avons inauguré l'Institut photovoltaïque d'Île-de-France, qui rassemble, aux côtés du CNRS et de l'École polytechnique, TotalEnergies et EDF. Leurs PDG nous ont dit alors: « Vous pouvez faire tous les progrès techniques que vous voulez sur les cellules photovoltaïques en silicium, nous avons perdu la guerre contre les Chinois, et ces progrès vont être utiles à l'industrie chinoise. En revanche, pour un autre matériau qui s'appelle la pérovskite, nous n'avons pas gagné la guerre, mais nous ne l'avons pas encore perdue. » Si vous dites à un chercheur ou à une chercheuse : « Tu ne veux pas "t'amuser" sur la pérovskite plutôt que sur le silicium? », dans 99,9 % des cas, la réponse sera: allons-y! Les chercheurs et les chercheuses ont compris que travailler avec les industriels, ce n'est pas se « vendre au grand capital », selon une formule périmée. Et les industriels ont découvert ce qu'ils pouvaient gagner à de vraies relations, dans la durée, avec le milieu académique.

> **« Quels domaines vont connaître de grandes évolutions ? Les données, les matériaux, le cerveau...**

Quels seront les grands enjeux de demain ?
Vous me demandez de me transformer en Madame Soleil… Je ne crois pas qu'il se passera quelque chose de miraculeux dans les prochaines années. Il y a bien sûr les sujets qu'on connaît déjà et qui vont se poursuivre: l'IA, le quantique, One Health…
Des champs un peu transverses vont connaître des évolutions importantes: tout ce qui est lié aux données, production comme exploitation. Et, nous l'avons évoqué, ce qui a trait aux matériaux. On voit bien qu'on a besoin de matériaux plus durables, moins coûteux, moins énergivores, etc. Et si je devais en citer un troisième, je dirais le cerveau. Fondamentalement, on n'en connaît pas grand-chose… et on a aussi besoin des sciences humaines et sociales pour l'étudier. Il faut augmenter les interactions entre les disciplines là encore, c'est d'ailleurs l'un des points sur lesquels on a fait des progrès ces dernières années. Nous en avons vraiment besoin, par exemple pour comprendre des réactions pas toujours rationnelles, on l'a vu pendant la crise sanitaire.

Le CNRS s'engage donc sur tous ces sujets.
Oui, nous avons signé avec l'État un contrat d'objectifs et de performance, qui s'arrête au 31 décembre prochain. L'objectif n'étant pas d'apporter la solution avec un grand S, mais des éléments de solution. Nous n'aspirons pas à décider à la place des gens, mais à apporter des connaissances.Cela doit montrer à la société notre utilité, parfois encore discutée, mais c'est important aussi pour les citoyens et les décideurs de savoir qu'ils peuvent s'appuyer sur des connaissances scientifiques. Lors de la mise en œuvre de ce contrat en 2019, nous avions mis en avant six grands défis sociétaux: changement climatique, transition énergétique, intelligence artificielle, santé et environnement, ce qu'on a appelé territoires du futur, et inégalités éducatives. Nous ignorons encore ce que comportera le prochain. Peut-être les sujets transverses que nous avons évoqués ou, pour prendre une question très « sciences humaines et sociales », les sociétés en transitions: numérique, écologique, énergétique…

Pour ce thème du climat, les chercheurs et chercheuses s'engagent de plus en plus...
Attention: la crédibilité de la science passe par le fait qu'il ne faut pas mélanger les casquettes. Les chercheurs et chercheuses sont des citoyens, ils ont le droit d'être militants. En revanche, ils n'ont pas le droit d'utiliser leur aura de scientifique pour tenter de promou-

voir leurs convictions personnelles. C'est difficile, je le reconnais, mais je pense que c'est essentiel.

Cette crédibilité passe par une intégrité sans failles…
C'est un vrai sujet. On constate cependant que, statistiquement, il n'y a pas beaucoup de fraudeurs, encore moins de « truands ». On a beaucoup de questions de plagiat, ou même d'auto-plagiat, voire de gens qui sont à la limite de la déontologie : vous avez fait un papier en « oubliant » de citer votre doctorant, de le créditer comme co-auteur, etc. Ce qui n'empêche pas qu'il faut être extrêmement strict là-dessus, parce que ce n'est rien de moins que la crédibilité de la parole scientifique qui est en jeu. Or je crois en l'importance de cette parole, pas comme une parole divine qui s'impose, mais comme le résultat d'un processus. Mais il est vrai que la course au nombre de publications n'aide pas. C'est pour cela que nous sommes de grands défenseurs de la science ouverte, avec une évaluation des travaux plus qualitative que quantitative.

La place des femmes en sciences a-t-elle augmenté ?
Elle est encore insuffisante, 30 % de nos effectifs scientifiques. Comment fait-on pour les accompagner ? Ce n'est pas si simple, c'est même parfois contraire à la loi française qui, dans la fonction publique, ne permet pas de prendre des mesures spécifiques.
Et il faut veiller à ne pas continuer à colporter de vieux discours sexistes. On continue encore trop souvent à dire que les maths et l'informatique, c'est pour les garçons. Alors que si vous allez dans les écoles d'ingénieurs en informatique du Maroc, par exemple, les jeunes filles sont majoritaires… Il n'y a donc pas de fatalité.

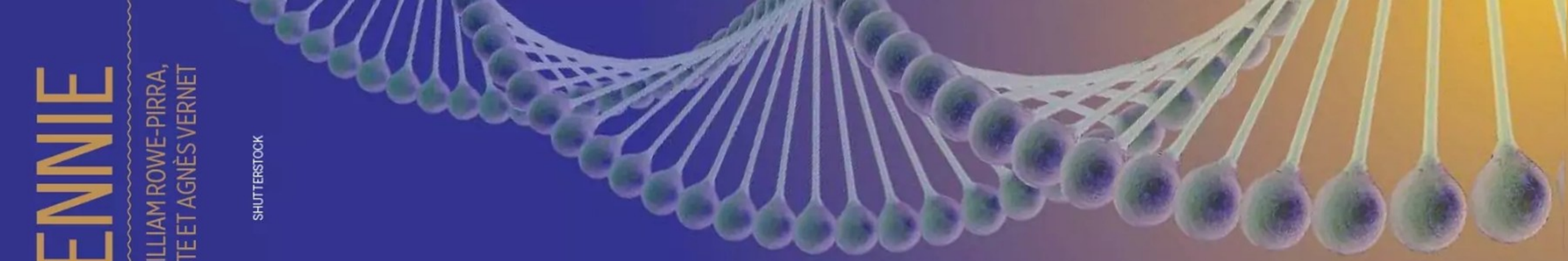
« L'IA est un outil formidable pour gagner du temps. Elle ne remplacera pas les chercheurs

Vous évoquiez l'intelligence artificielle. Va-t-elle changer la vie des chercheurs et chercheuses ?
L'impact numéro 1 de l'IA, c'est le traitement des données, comme je l'ai déjà dit. Et puis bien entendu l'IA générative, tel ChatGPT. Je ne suis pas inquiet : elle va être un formidable outil, utilisé par les chercheurs et les chercheuses pour gagner du temps. Elle ne les remplacera pas. Je crois beaucoup au fait que l'être humain va coopérer avec l'IA, mais comme il le fait déjà.
Au fond, elle oblige à penser. Il y a peu, j'ai fait une conférence sur l'IA pour le grand public, à Rennes, et j'ai utilisé ChatGPT. Je lui ai dit : « Fais-moi un résumé de deux cents mots sur l'IA, risques et opportunités ». C'était bluffant, vraiment bluffant. Puis je lui ai demandé d'écrire ma biographie. Et là, c'était un mélange de vérités et d'erreurs. Y compris ma date de naissance ! Par ailleurs, si tout le monde s'en sert, elle va se mettre à faire la même chose… Il faudra donc l'utiliser intelligemment. Nous parlions tout à l'heure de la chimie : pour simplifier, avant, les chimistes faisaient une molécule, puis ils en étudiaient les propriétés. Aujourd'hui, vous dites quelles propriétés vous voulez obtenir et le *deep learning* vous aide à trouver des candidats. Ensuite, à vous de les tester…

Le Haut Conseil de l'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur vient de rendre son rapport sur le CNRS. Il en souligne la bonne production scientifique, mais pointe certaines faiblesses, comme une cohérence insuffisante avec les autres acteurs de la recherche (notamment les universités), et une difficulté à retenir les meilleurs chercheurs. Que répondez-vous ?
Le comité a conclu son rapport par une affirmation qui ne souffre aucune ambiguïté : *« Le Comité considère le CNRS comme une institution de recherche majeure et de niveau mondial. »* Mais si nous nous contentons de nous reposer sur nos lauriers, nous ne tiendrons pas la distance et notre place dans la compétition féroce qui se déroule sur le champ mondial de la production des connaissances. Donc, je réponds, banco ! Bien sûr que le CNRS peut, et doit, mieux faire encore et toujours.
Et nous sommes pleinement conscients de nos responsabilités, que le Comité a aussi soulignées : *« Le CNRS joue un rôle clé dans l'écosystème français de la recherche et de l'enseignement supérieur. Il est dans une position unique pour jouer un rôle de leader dans la recherche française. »* Cela nous engage, nous serons au rendez-vous !

PROPOS RECUEILLIS PAR FLORENCE LEROY ET VINCENT REA
PHOTOS : QUENTIN HOUDAS/LEEXTRA POUR SCIENCES ET AVENIR

PAGES RÉALISÉES PAR LOÏC CHAUVEAU, JEAN-FRANÇOIS HAÏT, WILLIAM ROWE-PIRRA, PIERRE VANDEGINSTE ET AGNÈS VERNET



SHUTTERSTOCK

Paléogénétique

DÉCRYPTER LE PASSÉ dans l'ADN des fossiles, voilà la mission de cette science née dans les années 1990, et qui connaît un véritable essor depuis 2010 *(lire p. 16).* En extrayant des fragments d'ADN ayant survécu aux outrages du temps, les paléogénéticiens parviennent à scruter au plus intime des populations anciennes et à lire leur code génétique. Une véritable mine d'informations, qui nous renseigne sur nos ancêtres ou les maladies qu'ils ont pu contracter, mais aussi sur les structures sociales et familiales, les migrations, les métissages… Sans la paléogénétique, nous ne saurions pas qu'il y a un peu de Neandertal en nous !

HOMME DE DENISOVA

SON EXISTENCE ne tient qu'à une… phalange ! En effet, c'est l'ADN extrait d'un tout petit os de doigt trouvé en 2008 dans une grotte de l'Altaï, dans laquelle deux molaires ont également été mises au jour, qui nous a révélé l'existence de ce groupe d'humains, cousin des Néandertaliens, dont ils auraient divergé il y a environ 390 000 ans. Les Mélanésiens et les Tibétains auraient hérité certains de leurs gènes.

MAX PLANCK INSTITUTE

+4°C

SI RIEN N'EST FAIT pour supprimer l'usage du pétrole, du charbon et du gaz, la température moyenne de la planète aura augmenté de 4 °C en 2100 par rapport à 1850, début de l'ère industrielle *(lire p. 50).* Un scénario catastrophe. Aujourd'hui, cette hausse est de 1,1 °C, mais le réchauffement s'accélère.

Anthropocène

CETTE ÈRE GÉOLOGIQUE pourrait succéder à l'Holocène, notre ère actuelle, qui a débuté il y a 11 500 ans. L'Anthropocène entérine le fait que l'activité humaine a marqué profondément la Terre au point d'en modifier le climat et la biodiversité. L'Union internationale des sciences géologiques est en train de définir quel indice présent partout sur Terre doit servir de point de départ à cette nouvelle ère.

NASA

COP 21

EN DÉCEMBRE 2015, la 21e réunion des 195 États signataires de la Convention de l'ONU sur les changements climatiques adopte l'Accord de Paris. Ce texte détaille les obligations de chaque État en vue de sortir des énergies fossiles et de maintenir la hausse de la température mondiale en dessous de 2 °C par rapport au niveau pré-industriel.

GIEC

CRÉÉ EN 1988, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat rassemble la communauté scientifique autour de trois questions principales : la connaissance des mécanismes physiques du climat, l'adaptation aux impacts du changement climatique et l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre, avec notamment les moyens techniques et sociaux pour sortir des énergies fossiles *(lire p. 50).* Il publie ses rapports d'évaluation à intervalles réguliers. Le sixième a paru en 2023.

GETTY

ARN MESSAGER

CETTE MOLÉCULE, au cœur de nouvelles approches thérapeutiques en plein essor, est un élément crucial des processus de la vie *(lire p. 70).* Elle est chargée de lire et transmettre – d'où son nom – l'information codée dans les gènes afin de permettre la synthèse de la protéine correspondante. Son importance est telle que, selon une théorie, les ARN (dont il existe d'autres types que messagers) auraient été des précurseurs de l'ADN, à l'origine du vivant sur Terre.

microbiote

IL REGROUPE LES MILLIARDS de micro-organismes (bactéries, levures, parasites ou virus non pathogènes) qui habitent les intestins, la surface de la peau, l'intérieur des narines, de la bouche et des poumons ou encore la muqueuse vaginale *(lire p. 74).* Il participe activement à notre biologie pour la digestion, la fabrication de petites molécules utiles comme des vitamines, et l'immunité. Il agit ainsi sur tout le corps, même le cerveau.

SPL

ÉPIGÉNÉTIQUE

SOUS L'EFFET de l'environnement, les mécanismes épigénétiques influencent l'expression des gènes *(lire p. 24).* Ils l'activent ou la bloquent, la rendent intense ou non, sans jamais modifier la séquence d'ADN. Ils peuvent se transmettre d'une cellule mère à une cellule fille.

Immunothérapie

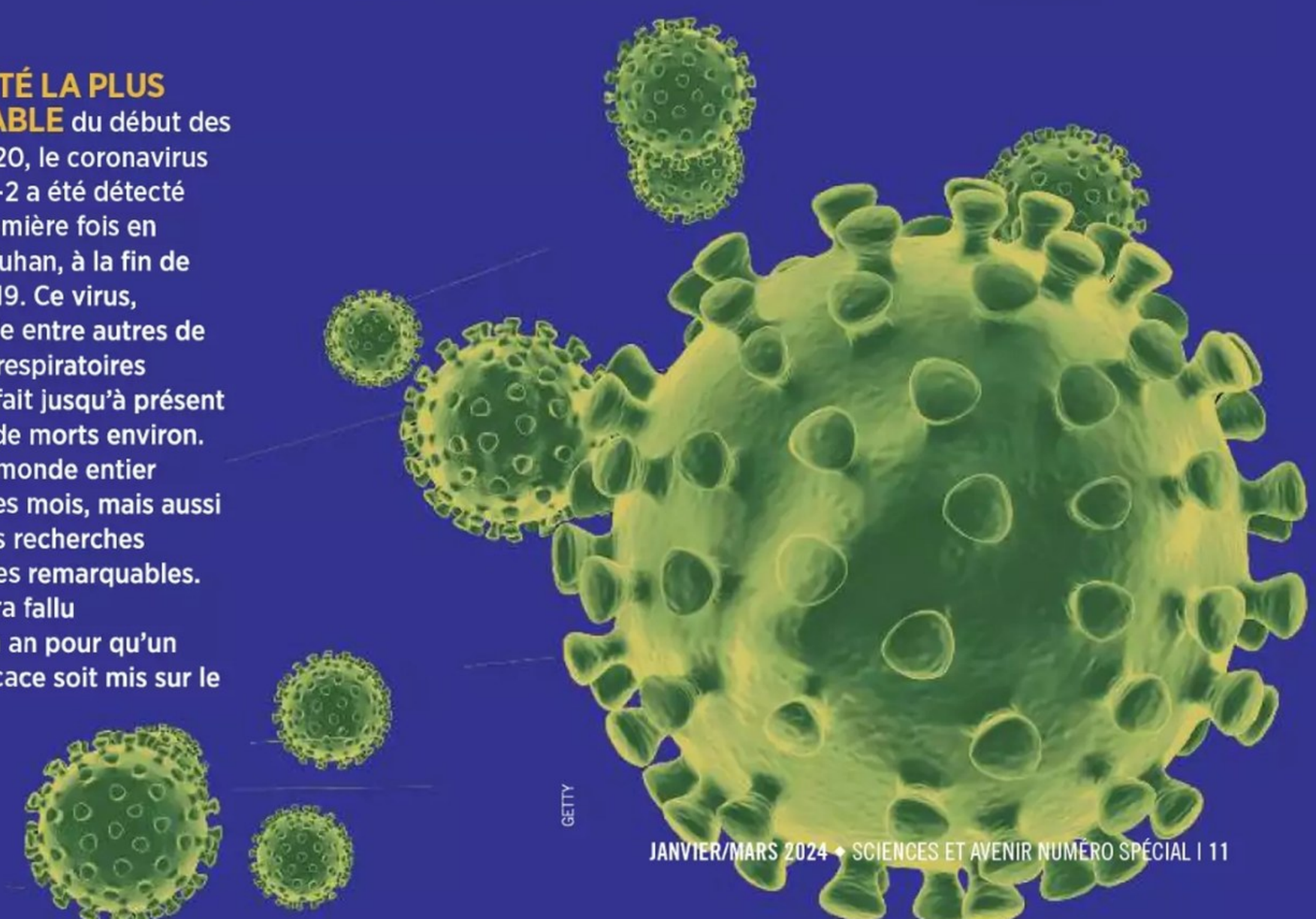
CETTE FAMILLE de traitements prometteurs agit sur le système immunitaire *(lire p. 73),* en particulier pour le stimuler, afin de soigner des cancers ou des maladies inflammatoires et dégénératives (sclérose en plaques, polyarthrite rhumatoïde…). Ils peuvent impliquer de petites molécules (par exemple des interférons, protéines du système immunitaire), des anticorps (comme les inhibiteurs de points de contrôle qui relancent le système immunitaire contre les cellules cancéreuses) ou des cellules transformées (à l'instar des cellules CAR-T, lymphocytes génétiquement modifiés pour cibler une cellule tumorale).

CRISPR-CAS9

PARFOIS QUALIFIÉ DE CISEAUX MOLÉCULAIRES, c'est un couple formé d'une enzyme et d'une petite séquence d'ARN *(lire p. 76).* Ensemble, elles sont capables de couper l'ADN à un endroit précis, avec un faible risque d'erreur. Cette fiabilité, observée chez des animaux, est désormais évaluée chez l'humain dans le cadre d'essais cliniques de thérapies géniques.

COVID-19

CÉLÉBRITÉ LA PLUS DÉTESTABLE du début des années 2020, le coronavirus SARS-CoV-2 a été détecté pour la première fois en Chine, à Wuhan, à la fin de l'année 2019. Ce virus, responsable entre autres de difficultés respiratoires sévères, a fait jusqu'à présent 7 millions de morts environ. Il a figé le monde entier pendant des mois, mais aussi stimulé des recherches scientifiques remarquables. Ainsi, il aura fallu moins d'un an pour qu'un vaccin efficace soit mis sur le marché.



GETTY

James-Webb

LE PLUS GROS (avec un miroir de 6,5 mètres de diamètre) et le plus cher (10 milliards de dollars) des télescopes spatiaux a décollé le jour de Noël 2021 *(lire p. 34)*. Les premiers résultats sont au-delà des espérances : galaxies lointaines, amas, nébuleuses, exoplanètes… dévoilent leurs secrets. Objectif principal de sa mission : sonder l'Univers lointain au plus près du Big Bang.

JWST

EXOPLANÈTES

ON EN RECENSE à ce jour plus de 5 500, mais il y en a sans doute des milliards. « Jupiters chauds », « minineptunes », « superterres », les exoplanètes sont souvent très différentes des planètes de notre système solaire. L'analyse de leur atmosphère, notamment par le télescope spatial James-Webb, permettra de mieux comprendre leur formation, avant peut-être d'y détecter de la vie.

T. PESQUET/FLICKR

Thomas Pesquet

C'EST LE SPATIONAUTE « 2.0 ». Ingénieur, pilote de ligne, sportif et musicien, le Français de 45 ans coche toutes les cases. Sélectionné en 2009, il passe six mois sur l'ISS en 2016-2017, d'où il tweete des images de sa mission et de la Terre. Il rempile en 2021. Au total, il a effectué six sorties dans l'espace. Aujourd'hui, il vise la Lune.

ONDES GRAVITATIONNELLES

POUR LES DÉTECTER, en 2015, il aura fallu mesurer l'infime vibration de faisceaux laser longs de plusieurs kilomètres. Les ondes gravitationnelles, prédites par la relativité générale d'Einstein, sont des déformations de l'espace-temps. Elles sont émises lors d'événements extrêmes comme la fusion de trous noirs ou d'étoiles à neutrons.

Trous noirs

PRÉDITS PAR LA THÉORIE de la relativité générale, ce sont des régions de l'espace où la force de gravité extrême capture la matière et la lumière. Impossibles à observer, croyait-on. Mais en 2019, en combinant des radiotélescopes géants, les astronomes obtiennent une image historique : le trou noir de la galaxie M87 qui se détache sur un fond de gaz chaud.

MARS

LES ROVERS Spirit, Opportunity et Curiosity l'ont démontré en analysant ses roches : la planète rouge était par le passé recouverte d'eau. Arrivé sur Mars en 2021, le rover Perseverance explore le delta d'une ancienne rivière qui coulait au fond du cratère Jezero il y a 3,6 milliards d'années. Il collecte des échantillons qu'il place dans de petits tubes. Ceux-ci seront rapatriés par la mission américaine Mars Sample Return vers 2030.

NASA

IA

SHUTTERSTOCK

INTELLIGENCE ARTIFICIELLE Ce domaine de l'informatique vise à élaborer des machines et logiciels capables d'effectuer des tâches qui nécessitent habituellement l'intelligence humaine (ou animale) en mimant artificiellement nos facultés de percevoir, comprendre, raisonner, apprendre, expliquer et interagir *(lire p. 64)*. La discipline a émergé dans les années 1950 et obtient ces dernières années des résultats impressionnants dus aux progrès de l'apprentissage profond.

Apprentissage profond (*deep learning*)

CETTE APPROCHE de l'apprentissage automatique fait appel à des réseaux de neurones artificiels imitant – pour l'essentiel – l'original biologique pour créer des modèles capables d'apprendre une tâche à partir d'exemples tirés d'une quantité considérable de données.

ChatGPT

RÉVÉLATION DE L'ANNÉE 2022, ChatGPT est un « agent conversationnel » (*chatbot* en anglais) développé par l'entreprise OpenAI. Il repose sur un grand modèle de langage (LLM), un réseau de neurones spécialisé dans le traitement du langage naturel, entraîné sur un volume de textes représentant des centaines de millions de mots. Il sait résumer, traduire, dialoguer… mais ses réponses, si elles sont syntaxiquement correctes, peuvent comporter des énormités.

BIG DATA

L'EXPRESSION FAIT RÉFÉRENCE à l'exploitation, à l'aide d'un outillage relevant par exemple de l'apprentissage automatique, de quantités massives de données portant sur un système complexe, dans le but d'en extraire des connaissances sur son fonctionnement. Les applications concernent des domaines aussi divers que l'industrie, l'ingénierie, le commerce, l'économie, la santé, les sciences…

LBGTQIA+

C'EST-À-DIRE lesbienne, gay, bisexuel·le, trans(genre), queer, intersexe, asexuel·le, et toute autre identité dont on peut se réclamer (+). Lesbienne, gay, bisexuel·le et asexuel·le se réfèrent à des orientations sexuelles. Trans et intersexe (né.e ni homme ni femme) définissent des identités de genre ou de sexe. De l'anglais « bizarre », queer revendique désormais une identité en dehors des typologies binaires masculin-féminin et homosexuel-hétérosexuel.

Genre

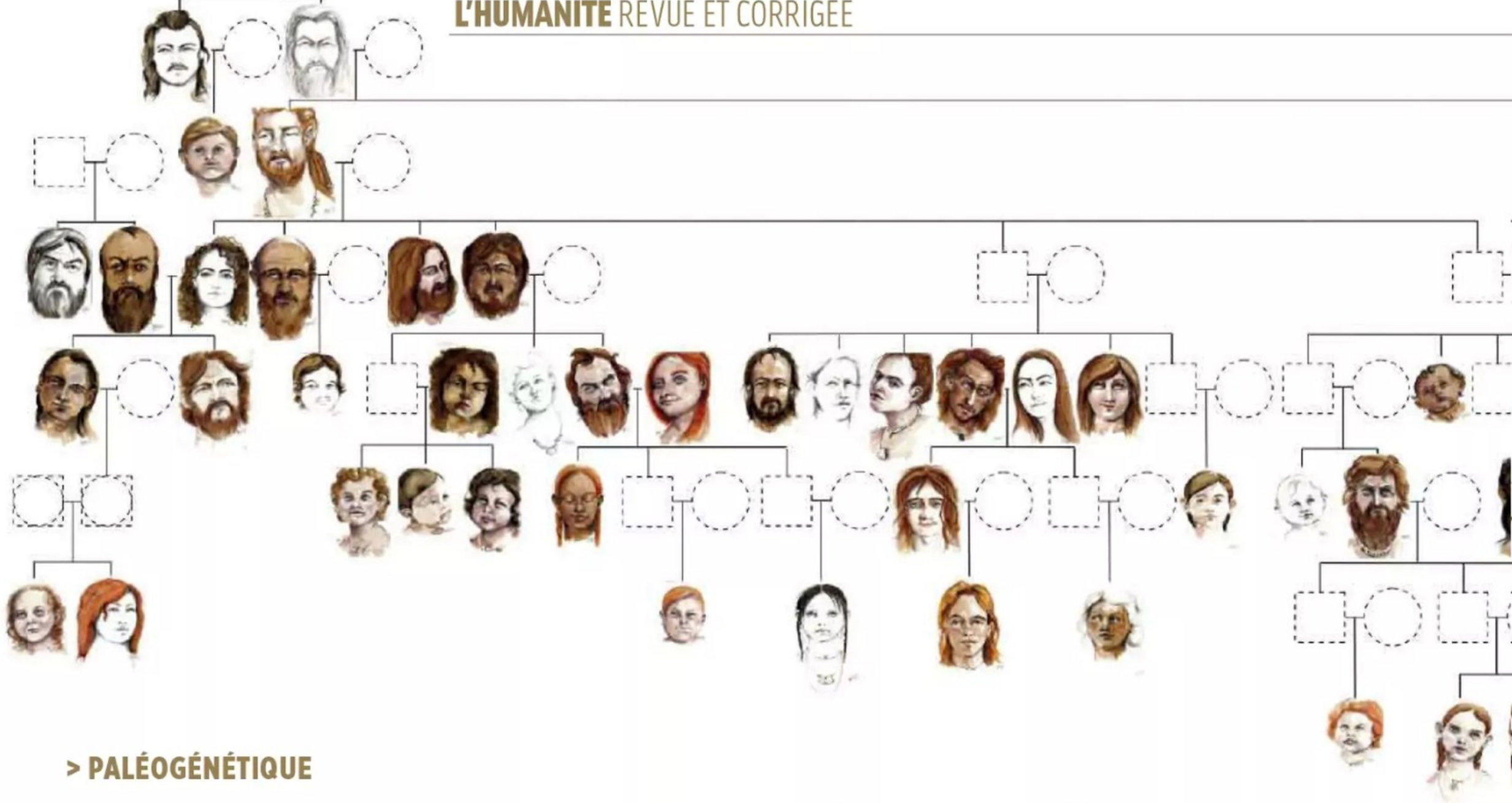
ALORS QUE LE SEXE est biologique, le genre est construit par la société dans laquelle on vit. C'est l'ensemble des caractéristiques qu'on attribue au fait d'être une femme, un homme, une fille ou un garçon. Cela inclut les normes, les comportements et les rôles associés à un sexe ou un autre.

L'HUMANITÉ revue et corrigée

Tout change… Même le passé ! L'archéologie réécrit aujourd'hui la vie des humains ordinaires avec un luxe de détails, en s'appuyant sur l'étude de l'ADN. Un ADN que l'on découvre moins immuable que prévu, au sein même des cellules de chacun d'entre nous. Notre identité génétique n'est donc pas figée, pas plus que ne l'est notre identité biologique. Et les chercheurs de mettre en garde : ne confondons pas sexe et genre !

WILL OLIVER/PA IMAGES/ABACA PRESS'

Neandertal, si proche de nous…
Grâce à l'ADN ancien, nous savons aujourd'hui qu'il nous a légué certains de ses gènes. Reconstitution d'un néandertalien réalisée par Adrie et Alfons Kennis.



> PALÉOGÉNÉTIQUE

Le nouvel art de faire parler les fossiles

Depuis les années 2010, l'analyse d'infimes vestiges d'ADN ou de protéines réécrit notre plus lointain passé. Après les métissages Sapiens-Neandertal, elle vient de révéler l'organisation, sur des générations, d'une famille paysanne « bourguignonne » d'il y a 7000 ans.

Dans les années 2000, la petite commune de Gurgy, nichée dans un méandre de l'Yonne, a livré l'une des plus grandes nécropoles françaises du néolithique. Les ossements de cent vingt-huit individus et quantité de sépultures y témoignent d'une longue occupation du site – un millier d'années – à partir du Ve millénaire avant notre ère, époque à laquelle les pratiques agricoles sédentaires s'implantent sur le territoire de la France actuelle. Difficile, cependant, d'en savoir plus sur ces individus et leur société à partir des méthodes morphologiques et archéologiques classiques – datation au carbone 14 ou par luminescence, étude de l'industrie lithique ou de la céramique. Surtout en l'absence d'objets ou de traces écrites…

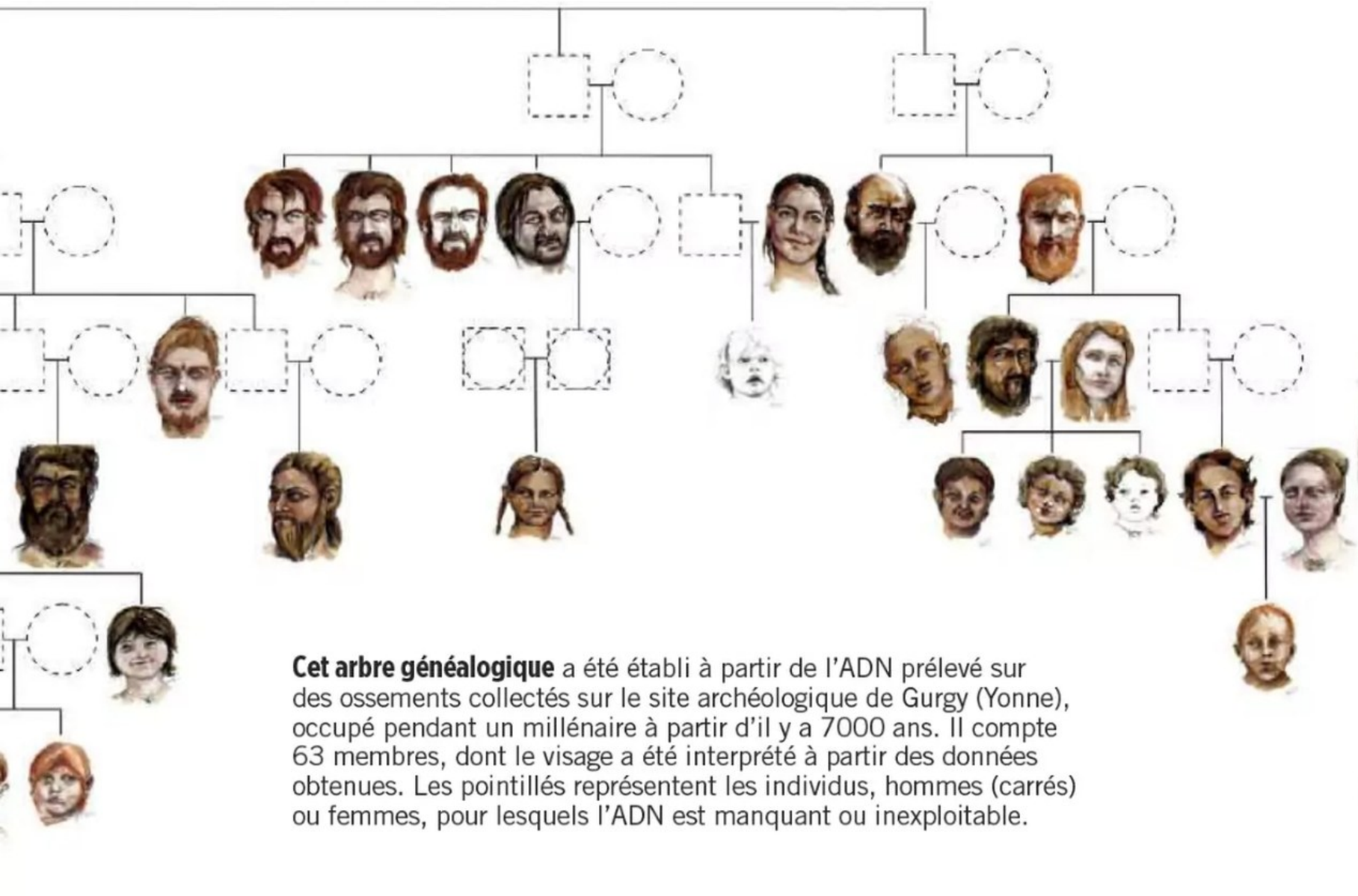
Vingt ans plus tard, Maïté Rivollat, paléogénéticienne à l'université de Bordeaux, et ses collègues ont levé le voile sur ce groupe d'humains. Dans une étude parue en juillet dernier, ils ont analysé de l'ADN ancien provenant des ossements de Gurgy et ont ainsi pu reconstituer l'arbre généalogique de deux familles de 63 et 12 individus. Cela leur a permis de mettre en évidence la structuration sociale de cette communauté étendue sur plusieurs générations, axée autour des hommes qui naissaient et mouraient sur place tandis que les femmes venaient de groupes extérieurs.

Mais que s'est-il passé en vingt ans pour qu'un tel mystère puisse être résolu ? Cet exemple n'est en fait que l'un des résultats les plus récents d'une discipline jeune qui a le vent en poupe : la paléogénétique, l'analyse de l'ADN ancien. Depuis ses débuts en 1984 – quand l'équipe du biochimiste néo-zélandais Allan Wilson, à l'université de Berkeley (Californie), séquence pour la première fois de l'ADN

La Terre au Carré, émission radio de Mathieu Vidard, « Voyage dans le passé grâce à la paléogénétique », France Inter, 12 janvier 2021, sciav.fr/vidard

Ludovic Orlando, *L'ADN fossile, une machine à remonter le temps,* Odile Jacob, 2021

Conférences de Lluis Quintana-Murci au Collège de France, « L'histoire de l'humanité vue sous l'angle de la paléogénomique », sciav.fr/quintana-murci



Cet arbre généalogique a été établi à partir de l'ADN prélevé sur des ossements collectés sur le site archéologique de Gurgy (Yonne), occupé pendant un millénaire à partir d'il y a 7000 ans. Il compte 63 membres, dont le visage a été interprété à partir des données obtenues. Les pointillés représentent les individus, hommes (carrés) ou femmes, pour lesquels l'ADN est manquant ou inexploitable.

DESSINS ELENA PLAIN, AVEC L'AIMABLE AUTORISATION DE PACEA, UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

ancien, issu d'un spécimen de quagga, une sous-espèce de zèbre qui s'est éteinte au XIXe siècle –, le champ d'investigation s'est élargi et affine de jour en jour notre connaissance du passé.

Sur le papier, son application à la paléoanthropologie est simple. Les chercheurs tentent de voir si les fossiles humains – nouvellement découverts ou conservés dans les collections depuis des décennies – contiennent des fragments d'ADN ayant résisté au passage du temps. Le cas échéant, ils les extraient pour les analyser et réassembler les génomes de nos ancêtres et cousins disparus. Ces génomes anciens sont de véritables mines d'informations sur les populations du passé – la lecture des séquences de nucléotides de l'ADN renseigne sur les gènes de son propriétaire et, par extension, sur les caractéristiques physiologiques et morphologiques que codent ces dernières. Les chercheurs s'intéressent par exemple aux régions qui diffèrent entre ces génomes anciens et des génomes de référence modernes. Mais la tâche n'est pas simple. Il faut en effet séparer le matériel génétique humain de celui dit environnemental (bactéries, végétaux, animaux) et s'assurer que l'échantillon n'est pas contaminé par la sueur, les poils ou le sang du manipulateur moderne. De plus, extraire une quantité suffisante d'ADN peut aboutir à l'altération, voire à la destruction du fossile… un problème quand certains – souvent ceux du paléolithique (-2,5 millions d'années à -12 000) – sont d'une grande rareté ! Ainsi, l'humérus extrait du squelette découvert en 1856 dans la vallée de Neander, en Allemagne – qui nous a révélé l'existence *d'Homo neanderthalensis* – est désormais en morceaux…

MNHN - VINCENT DUCARD

« CETTE DISCIPLINE OFFRE DE NOUVELLES APPROCHES POUR COMPRENDRE CERTAINS MÉCANISMES SOCIAUX DES POPULATIONS DU PASSÉ »

Céline Bon, paléogénéticienne, Muséum national d'histoire naturelle

La révolution du séquençage à très haut débit

« Les débuts ont été enthousiastes mais laborieux, les premiers protocoles ne commençant à être sérieusement développés qu'au début des années 2000, explique Céline Bon, paléogénéticienne au Muséum national d'histoire naturelle. *La paléogénomique [la reconstitution des génomes anciens, ndlr] prendra son véritable essor à partir du début des années 2010. »* Pour cela, il aura fallu attendre l'arrivée des techniques de séquençage de nouvelle génération, à très haut débit, qui permettent de lire l'ADN rapidement et à coût réduit.

Dès lors, la course à l'ADN ancien est lancée, en l'occurrence par le paléogénéticien finlandais Svante Pääbo (qui recevra pour ses travaux le prix Nobel de physiologie ou médecine en 2022) et ses collègues de l'Institut Max-Planck d'anthropologie évolutionniste. En 2010, ils publient un premier séquençage du génome d'*Homo neanderthalensis*. Quatre milliards de nucléotides, récoltés sur des fossiles de trois néandertaliens découverts dans la grotte de Vindija, en Croatie. Pour la première fois, il est possible de scruter l'intimité de notre ◆◆◆

Maladies d'hier et d'aujourd'hui

En 2012, lors des premières analyses des restes d'Ötzi à la recherche d'ADN ancien, une grande partie du génome de *Borrelia burgdorferi,* la bactérie responsable de la maladie de Lyme, y a été repérée. Cette découverte a fait de la momie le plus ancien porteur connu de cette pathologie, illustrant comment la paléogénétique permet d'étudier la coévolution des humains et de leurs pathogènes. *« L'objectif est de déterminer depuis quand les maladies actuelles affectent l'humanité,* précise Céline Bon. *Mais cette approche ne nous informe pas sur les maladies virales, puisque la plupart, comme la grippe ou récemment le Covid, sont causées par des virus à ARN. »* Or l'ARN, trop fragile, ne peut pas résister au passage du temps. Autre question qui taraude la paléopathologie : celle de la pression de sélection des maladies. *« Il y a fort à parier que les maladies qui nous affectent aujourd'hui ont émergé assez récemment,* note Céline Bon. *Et beaucoup de celles qui touchaient nos ancêtres ont disparu. »* Or, les approches de paléogénétique consistant à comparer l'ADN ancien avec des génomes de référence modernes, il est impossible d'accéder à des séquences de pathogènes anciens. En janvier 2023, Lluis Quintana-Murci, généticien des populations à l'Institut Pasteur, et ses collègues publiaient une étude consacrée à l'évolution du système immunitaire. À partir des gènes de 2800 individus ayant vécu en Europe ces 10 000 dernières années, ils montraient qu'une augmentation importante des mutations avantageuses dans la lutte contre les pathogènes est survenue après l'âge du Bronze, il y a 4 500 ans.

◆◆◆ plus proche parent, disparu depuis au moins 30 000 ans, et de comparer son génome à celui d'*Homo sapiens*. Ces nouvelles données éclairent les paléoanthropologues sur l'origine génétique des différences entre *Homo sapiens* et néandertaliens, grâce à la comparaison des séquences d'ADN dissimilaires (d'espèces différentes) – on en compte alors 78 – et permettent d'estimer la date à laquelle les deux espèces ont divergé : il y a environ 800 000 ans.

Homo sapiens définitivement déboulonné de son piédestal

Et ce n'est pas tout. Au fil de leurs travaux, les chercheurs vont faire une autre découverte, spectaculaire : le génome des Européens et des Asiatiques actuels possède environ 2 % de gènes d'origine néandertalienne. Il y a donc du Neandertal en nous ! L'analyse de l'ADN ancien a ainsi déboulonné le mythe d'une étanchéité totale entre les espèces du genre Homo et d'une « supériorité » immanente de *Sapiens*. Un métissage entre des groupes humains a bel et bien eu lieu, et ce n'était vraisemblablement pas chose rare. Observer l'ADN fossile permet désormais de savoir où se sont effectués ces métissages – en comparant les ADN des individus métissés aux génomes d'humains découverts dans des régions particulières – et entre quels groupes d'humains.

Au même moment retentissait un autre coup de tonnerre. David Reich, de la Harvard Medical School, aux États-Unis, et ses collègues, dirigés par Svante Pääbo, publiaient, en 2010 également, l'analyse génétique d'un hominidé inédit, reconstitué à partir de l'ADN d'un fragment de phalange découvert deux ans plus tôt dans la grotte de Denisova, en Sibérie. L'ADN mitochondrial – l'ADN situé dans la mitochondrie, la centrale énergétique de la cellule, et non dans le noyau, et exclusivement transmis par la mère – est sans équivoque : cet hominidé n'est ni un *Sapiens* ni un néandertalien. Un groupe d'humains entier venait d'être découvert grâce à l'analyse de matériel génétique conservé dans un os de moins d'un centimètre de long ! Pour l'heure, seuls trois génomes attestent de son existence, et très peu d'informations morphologiques permettent de le caractériser.

Pourtant, l'homme de Denisova a fait couler beaucoup d'encre. Des études ultérieures ont notamment révélé, en 2016, qu'il avait légué aux populations mélanésiennes 4 à 6 % de leur ADN ; en 2018, qu'il s'était aussi hybridé avec des néandertaliens ; et en 2019, qu'il aurait été le premier à occuper le plateau tibétain, transmettant aux ancêtres des Tibétains actuels la version du gène qui leur a permis de s'adapter à ce milieu pauvre en oxygène.

L'analyse de l'ADN d'une phalange trouvée en 2008 dans une grotte de Sibérie (ici, sa réplique) a révélé l'existence d'*Homo denisova*, une espèce humaine inconnue.

THILO PARG/WIKIMEDIA COMMONS

L. HOUGHTON/SPL/SUCRÉ SALÉ

« De manière générale, la paléogénétique apporte des éclairages nouveaux sur les mouvements de populations et le métissage des humains anciens, explique Céline Bon. *Cette discipline fournit des informations complémentaires en réponse à des questions qui se posent depuis des années. Lorsque l'on détecte, par exemple, au sein d'une population d'agriculteurs, des variants génétiques d'une population de chasseurs-cueilleurs, cela donne lieu à de nouveaux questionnements très intéressants ! »*

Illustrant ce propos, Johannes Krause, de l'Institut Max-Planck d'anthropologie évolutionniste, et ses collègues publiaient en août 2023 une nouvelle analyse génomique d'Ötzi, la très célèbre momie retrouvée congelée dans un glacier alpin en 1991 *(lire l'encadré p. 18)*. Le génome de cet individu, qui a vécu 3300 ans avant notre ère, révèle que la pigmentation de sa peau était plus sombre qu'on ne le pensait, un constat surprenant au regard des populations contemporaines de la région. Son ADN montre qu'il descendait directement des premières populations agricoles d'Anatolie ; sa communauté vivait donc dans un certain degré d'isolement, avec des apports génétiques des groupes de chasseurs-cueilleurs voisins assez limités. Autant de résultats qui contredisent les conclusions précoces tirées d'analyses génétiques – vraisemblablement contaminées – effectuées en 2012, et qui attribuaient à la momie une ascendance sarde, avec un influx génétique originaire des steppes. *« Cela montre bien comment la reconstitution d'un tel individu peut être biaisée par nos propres préconceptions des humains du néolithique en Europe »*, note Johannes Krause.

La paléoprotéomique est une alternative à l'étude de l'ADN ancien qui consiste à prélever et analyser les protéines (moins fragiles que l'ADN) conservées par exemple dans les os ou les dents. Pour les étudier, la principale technique utilisée est la chromatographie liquide couplée à un spectromètre de masse. On sépare d'abord les différentes espèces chimiques d'un échantillon en les faisant migrer dans un liquide où elles se déplacent à des vitesses différentes. Puis elles sont identifiées grâce à leur masse.

Dans le permafrost, de l'ADN de mastodonte et de plantes boréales

Pour Céline Bon, les possibilités de la paléogénétique sont multiples. *« Elle offre aussi de nouvelles approches pour comprendre certains mécanismes sociaux des populations du passé,* remarque-t-elle. *Cela passe par la reconstitution des règles de mariage en établissant les relations de parenté, qui peuvent nous en dire long sur les structures sociales et la taille des groupes, comme dans le cas de la nécropole de Gurgy. »*

Mais quelles sont les limites de cet outil qui semble défier les outrages du temps ? En 2022, dans le nord du Groenland, l'équipe d'Eske Willerslev, généticien de l'évolution aux universités de Cambridge et de Copenhague, a extrait du permafrost et séquencé de l'ADN environnemental vieux de près de deux millions d'années – l'ADN le plus ancien jamais analysé à ce jour. Le cocktail contenait du matériel génétique de mastodonte, de renne, de lièvre, de bouleau et d'autres plantes boréales. Un exploit rendu possible par la conservation des échantillons dans la glace. En effet, pour être analysé par les technologies actuelles, l'ADN ne doit pas être conservé plus de quelques centaines de milliers d'années. En 2014 et 2016, Svante Pääbo et ses équipes séquençaient l'ADN issu de restes humains de la grotte de Sima de los Huesos, en Espagne, âgés de 430 000 ans ! Le plus vieil ADN d'humain à ce jour – et un ADN précieux, puisqu'il a précisé l'arbre phylogénétique entre Sapiens, néandertaliens et dénisoviens. Mais la plupart des travaux de paléogénétique se concentrent sur des vestiges de ces 80 000 dernières années. En effet, l'ADN ancien n'est pas une ressource illimitée et infaillible. Il peut se dégrader vite, en particulier dans des milieux chauds ou humides, et ne résiste pas aussi bien au passage du temps que d'autres composés organiques telles les protéines. C'est vers elles, d'ailleurs, que certains chercheurs se tournent aujourd'hui. ◆◆◆

SVEND FUNDER/AFP

Record pulvérisé ! L'analyse de l'ADN extrait d'échantillons de sédiments prélevés dans le nord du Groenland a permis au généticien danois Eske Willerslev et à son équipe de décrire cette région il y a… deux millions d'années. Ici poussait une forêt ouverte de peupliers et de bouleaux, peuplée de rennes, de lièvres et d'oies parmi lesquels voletaient des insectes.

◆◆◆ Petite sœur en pleine croissance de la paléogénétique, la protéomique arrive sur la scène archéologique en 2009 lorsque Michael Buckley, de l'université d'York, et ses collègues parviennent à identifier des espèces animales à partir de protéines prélevées sur leurs ossements. *« Nous travaillons entre autres avec les collagènes – protéines présentes dans les cartilages ou les os –, à partir desquels nous obtenons des peptides – la sous-unité qui constitue les protéines – spécifiques à certaines familles, genres ou espèces,* explique Patrick Auguste, paléontologue et archéozoologue à l'université de Lille. *Encapsulées dans les os, ces protéines peuvent traverser jusqu'à deux millions d'années. »* Les chercheurs doivent réduire les os en poudre et analyser leur constitution à l'aide de spectromètres de masse. Difficile à envisager lorsque les fossiles sont trop petits ou trop précieux pour être altérés. Mais en juin 2023, Patrick Auguste, Fabrice Bray, chimiste à l'université de Lille, et leurs collègues parvenaient à démontrer qu'un milligramme de matière suffit à identifier l'organisme dont proviennent les ossements, grâce à un spectromètre à très haute résolution et à une optimisation des échantillons.

PATRICK AUGUSTE

« LE CHAMP DES PROTÉINES EST VASTE. PAR EXEMPLE, L'AMÉLOGÉNINE PRÉSENTE DANS L'ÉMAIL DENTAIRE EXISTE EN VERSIONS X OU Y, ET INFORME DONC SUR LE SEXE BIOLOGIQUE DE SON PROPIÉTAIRE »

Patrick Auguste, paléontologue à l'université de Lille

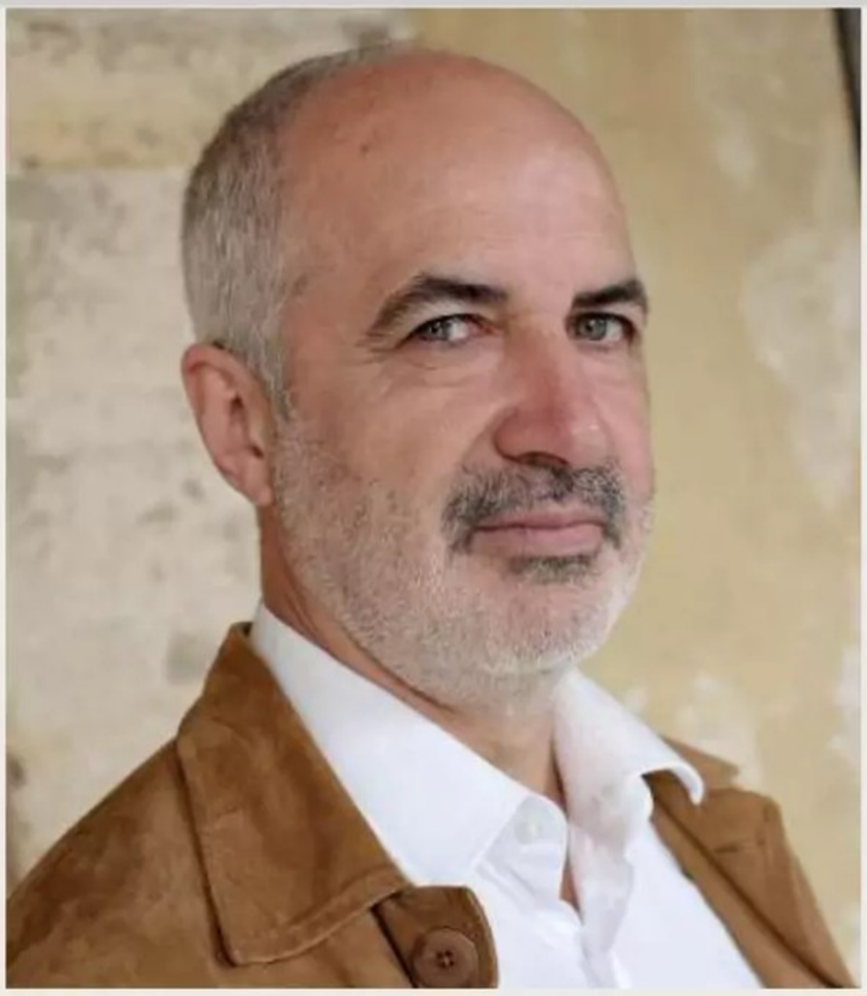
Rendre à Denisova la mandibule qui lui appartient

« Le champ des protéines est vaste, ajoute Patrick Auguste. *L'amélogénine, présente dans l'émail dentaire, par exemple, existe en versions X ou Y, et informe donc sur le sexe biologique de son propriétaire. »* En déterminant l'identité des animaux trouvés sur des sites archéologiques d'humains anciens – leur espèce, leur sexe, leur âge à leur mort – grâce à un large répertoire de marqueurs peptidiques, les paléoanthropologues peuvent donc tirer des conclusions quant aux pratiques de chasse ou d'élevage de ces groupes. *« La paléoprotéomique est complémentaire des autres approches de la paléontologie,* souligne Patrick Auguste. *Elle intervient là où les analyses d'ADN ou morphologiques de vestiges trop anciens ou altérés sont impossibles. »*

En 2019, l'équipe de Jean-Jacques Hublin, paléoanthropologue à l'Institut Max-Planck d'anthropologie évolutionniste, employait cette technique pour identifier un fragment de mandibule vieux de 160 000 ans, découvert dans la grotte de Baishiya, en Chine. Résultat : celle-ci aurait appartenu à un dénisovien. Une première depuis l'identification de ce groupe humain en 2010, dont le registre fossile demeure à ce jour très maigre et était inexistant jusqu'alors hors de la grotte éponyme. Avec cette découverte, la carte de répartition de l'homme de Denisova commençait à se dessiner avec plus de précision…

En une quinzaine d'années prolifiques, ADN et protéines ont donc permis de peaufiner notre connaissance de nos ancêtres et de leurs sociétés. Or, déjà, les architectes de ces nouvelles approches se tournent vers de nouveaux défis. Ludovic Orlando, directeur du Centre d'anthropobiologie et de génomique de Toulouse, commence par exemple à s'intéresser aux épigénomes anciens, l'ensemble des modifications de l'expression des gènes. Le microscopique a encore beaucoup de choses à nous raconter sur le passé humain.

WILLIAM ROWE-PIRRA



DIDIER GOUPY/SIGNATURES

DOMINIQUE GARCIA
Président de l'Institut national de recherches archéologiques préventives (Inrap)

« Toute la France est devenue un site archéologique »

Avec la multiplication des sites de fouilles et des outils, l'archéologie s'est ouverte à de nouveaux objets d'études, révélant le visage d'humains ordinaires.

L'archéologie semble avoir beaucoup évolué ces dernières années.
C'est certain ! Pendant longtemps, sa mission a consisté à étudier des objets, des monuments ou des sites – une villa romaine, une grotte préhistorique, etc. Mais depuis une quinzaine d'années, trois facteurs ont considérablement évolué : l'objet archéologique lui-même, l'objectif des fouilles et les outils *(lire aussi p. 22-23)*. Alors qu'elle était surtout liée à l'histoire de l'art, la discipline s'est enrichie grâce aux sciences de la terre et de la nature.

Vous disiez que les objets recherchés et le but des fouilles ont changé ?
On fouille encore pour trouver des artefacts, mais on travaille aussi le sédiment pour y recueillir des éléments (charbon de bois, graines, pollens) qui renseignent sur l'environnement. En étudiant le site dans son contexte, on réfléchit à la notion de territoire, et donc à des constructions politiques. On se demande comment se sont formés les premiers villages, les premières villes, et l'on aborde des phénomènes sociaux.

L'être humain et ses interactions occupent désormais une place centrale dans les travaux des archéologues…
Exactement. Pendant longtemps, ces derniers se sont intéressés aux objets fabriqués par les humains, sans se pencher sur les humains eux-mêmes du point de vue anthropologique. Mais depuis que les archéologues étudient également les restes des individus, et parfois leur ADN, ils cherchent à déterminer les causes de leur décès, leurs pathologies, leur alimentation, leurs conditions de vie…

Précisément, l'archéologue fait-il de plus en plus appel à d'autres disciplines scientifiques ?
Il n'y a plus de profil-type d'archéologue aujourd'hui, parce qu'il ou elle a bien souvent suivi une autre formation de base. Dans les équipes de l'Inrap, il y a aussi des architectes, des généticiens, des géomorphologues… de sorte que les sites sont devenus des laboratoires à ciel ouvert, lieux d'un véritable dialogue interdisciplinaire.

Quel est l'apport de l'archéologie préventive dans cette évolution ?
Jusqu'aux années 1970, seuls quelques sites (Vaison-la-Romaine, Lascaux, etc.) étaient sanctuarisés, les autres restant méconnus. Mais depuis une vingtaine d'années, c'est toute la France qui est devenue un grand chantier archéologique ! Les fouilles que réalise l'Inrap avant tous les travaux d'aménagement du territoire ont révélé près de 50 000 sites totalement inédits, qui permettent d'avoir une vision transversale de l'évolution des pratiques funéraires, religieuses, culturelles, du développement des villes ou de la circulation.

Ces recherches permettent-elles de réécrire l'histoire du pays ?
On s'aperçoit surtout qu'on en avait raté une grande partie ! Aujourd'hui, on travaille sur un million d'années et on ne se dit plus : qui est le premier Français, Vercingétorix ou Charlemagne ? Ce ne sont pas tant les racines qui nous intéressent que les repères. On retrace l'évolution des paysages, des villes, des populations. Avec ce recul, l'archéologie produit aujourd'hui des modèles historiques sur des aspects aussi divers que l'immigration, le handicap ou le rapport à l'environnement.

Quel est, à vos yeux, le plus beau chantier de la dernière décennie en France ?
Je dirais la fouille de Lavau, près de Troyes. Elle a permis de découvrir la tombe d'un prince celte datée du v^{e} siècle, qui renfermait des objets uniques permettant d'interroger les relations entre la Méditerranée et l'Europe du Nord. C'est un site à la fois riche en mobilier et porteur de questionnements extrêmement forts.

PROPOS RECUEILLIS PAR SARA DE LACERDA

Vient de paraître :
Dominique Garcia et Marc Bouiron (dir.), *Atlas archéologique de la France*, Inrap/Tallandier, 2023

> ARCHÉOLOGIE

RÉVÉLER L'INVISIBLE, UNE AFFAIRE DE TECHNIQUES

Drones, lasers, scanners 3D, spectromètres… Sur le terrain comme dans les labos, la recherche archéologique s'appuie aujourd'hui sur des technologies de pointe pour recueillir et analyser les vestiges les plus infimes du passé.

« *Nous fouillons, c'est votre histoire.* » La devise de l'Institut national de recherches archéologiques préventives (Inrap) montre à quel point la fouille constitue le fondement de l'archéologie. Mais cela ne signifie pas pour autant que les outils dont celle-ci dispose se cantonnent à la pelleteuse ou au pinceau. Parce que creuser, ou prélever, c'est aussi détruire, elle vise aujourd'hui à agir de la manière la plus ciblée possible, en adoptant des technologies de pointe qui lui permettent même, parfois, de s'abstenir de fouiller !

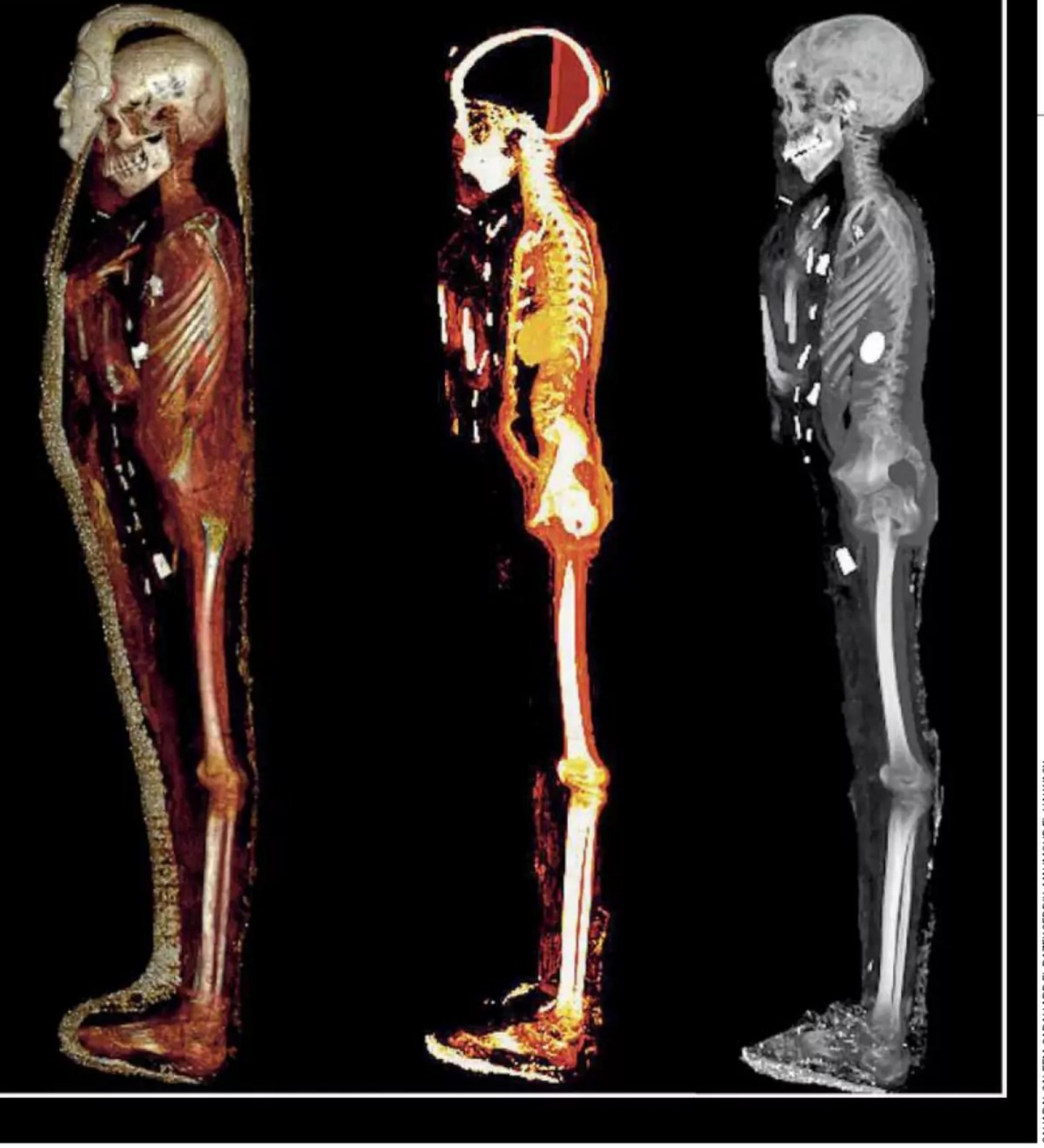
Il importe donc de savoir précisément où intervenir. Pour cela, les instruments géoradars et géomagnétiques, qui sondent le sol afin d'y détecter des anomalies, sont d'une grande utilité. C'est particulièrement le cas dans les estrans, où le paysage – y compris souterrain – ne cesse de se transformer au gré des marées. Là, on se fie entièrement au chariot de gradiométrie magnétique pour repérer les vestiges d'anciens habitats submergés, en mesurant le champ magnétique émis par les éléments présents dans les sédiments. C'est de cette manière que l'église de Rungholt, une ville détruite au XIVe siècle par un raz-de-marée, a été localisée en mai 2023 dans la mer des Wadden, en Allemagne du Nord.

Plus étonnant, le sol peut encore porter à sa surface la trace de structures disparues ou invisibles à l'œil nu. Pour les retrouver, on peut recourir à la télédétection par laser aéroporté (Lidar), un laser installé sur un avion ou sur un drone, qui permet de repérer les irrégularités dans le relief en mesurant le délai entre l'émission d'un faisceau de lumière et sa réflexion. Capable également de restituer la surface du sol en 3D, cette technique signale par exemple des bâtis caractéristiques des cités perdues de l'Amazonie, ou bien des cratères de bombes de la Seconde Guerre mondiale tapissant toujours les forêts européennes.

L'œil humain étant limité tant dans ses capacités de perception que dans sa vitesse d'exécution, les chercheurs de l'université de Yamagata (Japon) ont entraîné une intelligence artificielle (IA) afin qu'elle les aide à repérer des géoglyphes à Nazca, au Pérou, à partir de photographies aériennes. Ces motifs tracés au sol étant tous uniques, ils ont dû lui apprendre à en détecter de nouveaux en fonction des similitudes de certaines de leurs parties. Résultat : en 2018, l'IA a réussi à identifier en quelques mois à peine quatre figures encore inconnues, alors que les chercheurs avaient mis une dizaine d'années à en trouver environ cent quarante.

En laboratoire, les chercheurs recourent notamment à la spectrométrie de masse, une technique d'analyse des composés chimiques, pour mesurer la concentration du carbone 14 dans des objets et effectuer ainsi des datations très pré-

L'ARCHÉOLOGIE, QUI EXHUME LES DÉFUNTS ET LES "DÉSACRALISE", QUI REMUE LE PASSÉ, DOIT LE FAIRE AVEC LE PLUS GRAND RESPECT POSSIBLE



SAHAR N. SALEEM, SABAH ABD EL-RAZEK SEDDIK, MAHMOUD EL-HALWAGY

cises. Ils recherchent les espèces chimiques grâce à la chromatographie, une méthode qui permet de séparer les différents éléments d'un mélange, ou bien tentent d'extraire de l'ADN ancien et des protéines sur les restes organiques pour déterminer la filiation ou le sexe d'un individu (*lire p. 16*). Ils parviennent également à spécifier les zones géographiques où ce dernier a vécu en analysant les isotopes stables des éléments chimiques présents dans l'eau et les aliments, car ceux-ci ne se désintègrent pas et se déposent, au fil du temps, sur l'émail des dents. Il est même possible d'effectuer ces examens sur des restes calcinés !

Les archéologues se targuent aussi de pouvoir reconstituer la présence de matériaux complètement effacés, en recourant par exemple aux méthodes de la médecine légale, telles les inhumations expérimentales, pour comprendre comment les os se déplacent au cours de la décomposition. C'est ainsi que l'on a pu déterminer, dans le cas des momies de la vallée du Sado, au Portugal, l'utilisation de liens contraignant les corps, alors même qu'ils étaient absents.

Le présent impose aussi de nouveaux défis. La fonte des glaciers met au jour des objets qu'il faut rapidement retrouver avant qu'ils ne se dégradent à l'air libre. L'archéologie sous-marine se presse de localiser des épaves immergées, faute de quoi elles sont dévorées par des mollusques xylophages, les tarets. Et avec l'abandon programmé de la Station spatiale internationale (ISS), les archéologues spatiaux invitent déjà les astronautes à documenter leur séjour *in situ* afin de mieux comprendre leur occupation des lieux.

Golden Boy. La momie qui porte ce surnom a été virtuellement débarrassée de ses bandelettes par la radiologue Sahar Saleem à l'aide d'un scanner 3D. La dépouille est celle d'un adolescent d'il y a deux mille ans, que 49 amulettes en or protégeaient pour son voyage dans l'au-delà.

Du matériau dont on dispose, on cherche à retirer le plus d'informations possible sans le détériorer, comme le fait la chercheuse Sahar Saleem, radiologue à l'université du Caire, en examinant des individus momifiés au scanner 3D. La multiplication des prises de vue permet en effet de déballer numériquement les enveloppes de la momie, offrant une vue imprenable jusqu'à l'intérieur du corps conservé.

Intégrer les savoirs des populations autochtones

Car toutes les méthodes adoptées reposent sur une prise de conscience essentielle: l'archéologie, qui exhume les défunts et les « désacralise », qui remue le passé, doit le faire avec le plus grand respect possible. Le besoin de connaissances peut alors rencontrer d'autres formes de savoirs et les intégrer dans le processus archéologique. Cette tendance est déjà à l'œuvre aussi bien en Amérique du Nord qu'en Australie, où les « aînés » (*Elders*) des populations autochtones sont consultés et écoutés, que ce soit pour reconstituer les retrouvailles entre le cheval et les Premières nations américaines après l'arrivée des colons européens, ou pour comprendre la signification rituelle des écorces gravées par les Aborigènes. Plus encore, la participation de chercheurs autochtones peut être vécue comme une forme de « décolonisation » de l'archéologie… Et concourir ainsi à tisser une histoire commune entre tous les humains. **SARA DE LACERDA**

> ÉPIGÉNÉTIQUE

LA DYNAMIQUE DU GÉNOME

Immuable, notre identité génétique ? Rien n'est moins vrai ! Car au cours de la vie, le génome de chaque individu se transforme. Erreurs de copie, migration ou disparition de fragments entiers d'ADN… chaque cellule est une mutante !

« *L'ADN ne ment pas : c'est mademoiselle Rose qui a tué le docteur Lenoir !* », pourrait-on s'exclamer s'il existait une version génétique du Cluedo. Car souvent, qui dit ADN pense identité. Unique et immuable, il ne saurait induire en erreur. Sa séquence, la succession unique de 3 milliards de paires de bases – A, T, C et G –, serait figée dans le noyau de la cellule, soigneusement recopiée durant la vie entière afin d'en conserver les caractéristiques uniques. Et pourtant… Cette séquence va subir des changements tout au long de l'existence.

Première source d'évolution : le génome accumule des mutations. À chaque division cellulaire, de petites erreurs de copie peuvent survenir. Si elles ne perturbent pas le fonctionnement de la cellule, elles sont transmises à la génération cellulaire suivante. En 2018, une étude de chercheurs de l'université américaine Yale a estimé que, en moyenne, il apparaît 1,3 mutation dans chaque cellule du cerveau après une division. Cette valeur change d'un tissu à l'autre. Sachant que 20 millions de cellules se divisent à chaque seconde, le chiffre est loin d'être négligeable. Ainsi chaque cellule devient-elle, au fil des divisions, un peu différente de ses voisines, et ce dès l'embryogenèse.

Cette diversité est longtemps restée invisible, faute d'outil pour l'étudier. Mais les techniques de séquençage « sur cellule unique » changent la donne. Aux États-Unis, un projet des Instituts nationaux de la santé (NIH) vise ainsi à mesurer la diversité génétique qui rend chaque cellule unique. Il s'agit de collecter et analyser quinze tissus de 150 personnes ayant donné leur corps à la science. L'objectif est de mesurer les changements d'une cellule à l'autre pour comprendre quelles mutations influent sur la santé. « *Nous avions l'habitude de travailler sur "le" génome humain. En réalité, celui-ci est pluriel et varie au sein de chaque individu* », remarque l'oncologue Dan Landau du Centre du génome de New York, qui participe au projet.

De gros fragments d'ADN disparaissent parfois. Les messieurs ont, par exemple, tendance à perdre le chromosome Y au fil des divisions, en particulier dans les cellules du sang. Chez les hommes de 70 ans, 40 % des globules blancs en seraient dépourvus. Selon une étude de 2022, cette perte accroît le risque de développer des maladies cardiovasculaires ou une pathologie de l'œil, la DMLA.

L'horloge épigénétique tourne-t-elle rond ?

Plus impressionnant encore : des séquences se déplacent. Ces séquences transposables, qui représentent 45 % du génome humain, se trouvent hors des gènes qui codent les protéines, de sorte qu'on les a longtemps considérées comme de l'ADN « poubelle ». Mais l'on sait désormais qu'elles contribuent à l'apparition de cancers et constituent une source importante d'innovations génétiques.

Autre transformation de notre ADN : les télomères, des séquences qui protègent les bouts des chromosomes, raccourcissent au fil des divisions. Et s'ils mesurent moins de 4 000 paires de bases, c'en est fini de la prolifération cellulaire. La sénescence s'installe…

Le génome est donc plus dynamique qu'on ne le croit. Et plus encore l'est son expression ! C'est-à-dire la façon dont les gènes sont lus, ou non, pour produire des protéines. Un système de régulation organise cela « au-dessus des gènes » : l'épigénétique, du préfixe grec *epi*, « au-dessus ». « *On consi-*

Lise Barnéoud, *Les Cellules buissonnières*, Premier Parallèle, 2023

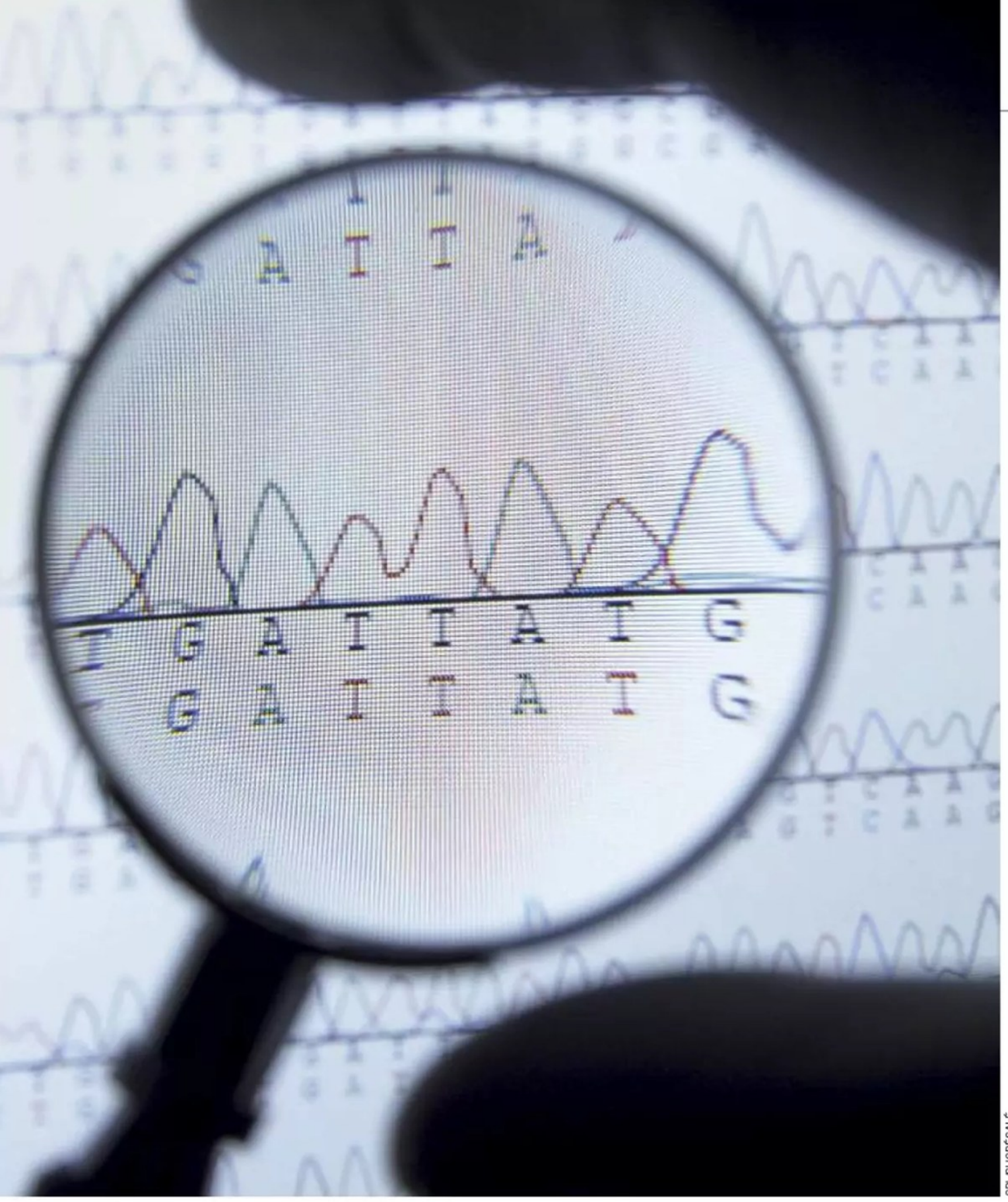
Documentaire de Laurence Serfaty, *Les Nouveaux Secrets de notre hérédité,* Arte, 2015, sciav.fr/serfaty

Série documentaire de Franck Cuveillier, « Épigénétique, quand l'ADN fait son intéressant », France Culture, 2023, sciav.fr/cuveillier

WEILL CORNELL MEDICINE

« NOUS AVIONS L'HABITUDE DE TRAVAILLER SUR "LE" GÉNOME HUMAIN… MAIS EN RÉALITÉ, CELUI-CI EST PLURIEL ET VARIE AU SEIN DE CHAQUE INDIVIDU »

Dan Landau, oncologue, Centre du génome de New York


SPL/SUCRÉSALÉ

dère que tout ce qui est héritable à travers les générations successives de cellules et ne modifie pas la séquence d'ADN peut être épigénétique », précise Germano Cecere, directeur de recherches à l'Institut Pasteur. Il s'agit de petites marques chimiques – appelées méthylations – ou de repliements de l'ADN qui empêchent la lecture des gènes, ou encore de petits ARN qui se collent à celui-ci pour réguler l'expression des gènes. L'épigénétique est fondamentale : dès l'embryogenèse, elle permet à un même génome de former des cellules de la rétine ou des muscles. Tout au long de la vie, elle adapte la biologie à un changement d'alimentation ou à un stress. « *On sait que l'épigénome* [l'ensemble des marques épigénétiques d'une cellule, ndlr] *change avec l'âge,* complète Jonathan Weitzman, professeur de génétique à l'université Paris-Cité. *On parle même d'horloge épigénétique.* »

Mais celle-ci avance-t-elle ou recule-t-elle, pour un individu donné ? Selon certains chercheurs, des mesures des méthylations, couplées avec des algorithmes de *machine learning*, permettraient de déduire l'âge biologique de la personne d'après un prélèvement de cellule. Objectif : découvrir si l'âge biologique est supérieur à l'âge chronologique, avec pour résultat des risques de maladie accrus. « *Mais ces travaux sont très controversés* », prévient Jonathan Weitzman. On connaît mal la mécanique de ces changements de méthylation, ce qui a pour conséquence de rendre douteuse leur utilisation prédictive.

Le génome ne se recopie pas toujours parfaitement. Au fil des divisions cellulaires, il accumule des mutations et ce, dès la formation des embryons.

En chaque enfant, des cellules de sa grand-mère

« *Ce qui compte, c'est ce qui est transmis à la génération suivante* », tranche Germano Cecere. Et sur cette question, les débats restent vifs. « *Tous les mécanismes épigénétiques peuvent être héritables* », poursuit le spécialiste. Héritables, certes, mais hérités ? De petits ARN se transmettent de parent à enfant chez le ver *Caenorhabditis elegans*. En revanche, on ne dispose d'aucune preuve pour les mammifères.

En outre, nos cellules ne sont pas uniquement… les nôtres. Après une grossesse, les femmes conservent dans leur sang des cellules du fœtus. Car le placenta n'est pas imperméable. Ce processus est même bidirectionnel, les enfants possédant des cellules de leur mère, et même de leur grand-mère. Toujours plus fort : peut-être héritons-nous de cellules des frères et sœurs ayant séjourné avant nous dans l'utérus de notre mère. Ces cellules d'origine familiale peuvent contribuer chez l'un au foie, chez l'autre au cerveau, ou encore aux gamètes. Et le phénomène a pu entraver des reconnaissances de parenté.

Notre identité biologique est donc plurielle. Elle est le résultat de processus évolutifs au sein de nos cellules et de la contribution d'autres génomes à notre biologie. La vie, ça bouge !

AGNÈS VERNET

> GENRE

Quel est le sexe des chercheurs ?

« Le masculin l'emporte » : chez les scientifiques aussi, ce préjugé a la vie dure. Pour ne pas biaiser leurs résultats, ils et elles doivent démêler sexe et genre, biologie et normes sociales.

Discuter du sexe des anges, ça ne sert à rien. Mais discuter du genre des entrepreneurs de la tech ou des chercheurs, c'est très utile et même indispensable pour ne pas commettre d'erreurs… scientifiques. Encore faut-il bien distinguer le sexe du genre, un concept sur lequel s'appuie de plus en plus la recherche. De quoi s'agit-il ? Selon l'Organisation mondiale de la santé, le sexe *« se réfère aux différentes caractéristiques biologiques et physiologiques des femmes, des hommes et des personnes intersexuées, telles que les chromosomes, les hormones et les organes reproducteurs »*. C'est donc un sujet de biologie avant tout. Quant au genre, la même institution y rapporte les *« caractéristiques des femmes, des hommes, des filles et des garçons qui sont socialement construites. Cela inclut les normes, les comportements et les rôles associés au fait d'être une femme, un homme, une fille ou un garçon, ainsi que les relations entre les personnes »* dans une société donnée.

Certaines idées préconçues sur les femmes ou les hommes ont laissé leur marque dans la science. *« De nombreuses théories sont construites sur la supposée supériorité des hommes sur les femmes. C'est ce qu'on appelle l'androcentrisme »*, raconte Jean-Louis Vercher, neurophysiologiste, co-président du Comité parité égalité du CNRS. Ce présupposé a notamment influencé la recherche concernant le dimorphisme sexuel, c'est-à-dire les différences morphologiques plus ou moins marquées entre les individus de sexes différents. Dans les années 1950, on constate, chez l'humain, que cette différence dépend des chromosomes X et Y. Mais on ignore comment ces derniers orientent le devenir d'un embryon vers tel ou tel sexe. Une idée s'impose alors parmi les biologistes : le féminin est le sexe par défaut dans le schéma développemental. *« Les chercheurs pensaient que le chromosome X contenait le matériel de base et que Y était un petit plus, le petit plus qui fait un homme »*, reprend Jean-Louis Vercher.
Le développement de la biologie moléculaire va mettre à mal cette idée. Car lorsque les biologistes cherchent l'expression moléculaire de ce « petit plus », ils la trouvent dans le gène SRY, le facteur de développement des testicules mais… ils révèlent aussi l'existence d'un autre gène, DAX1, qui détermine la formation des ovaires. *« Cela a changé le cadre théorique. On cesse alors de considérer le féminin comme le sexe par défaut »*, conclut Jean-Louis Vercher.

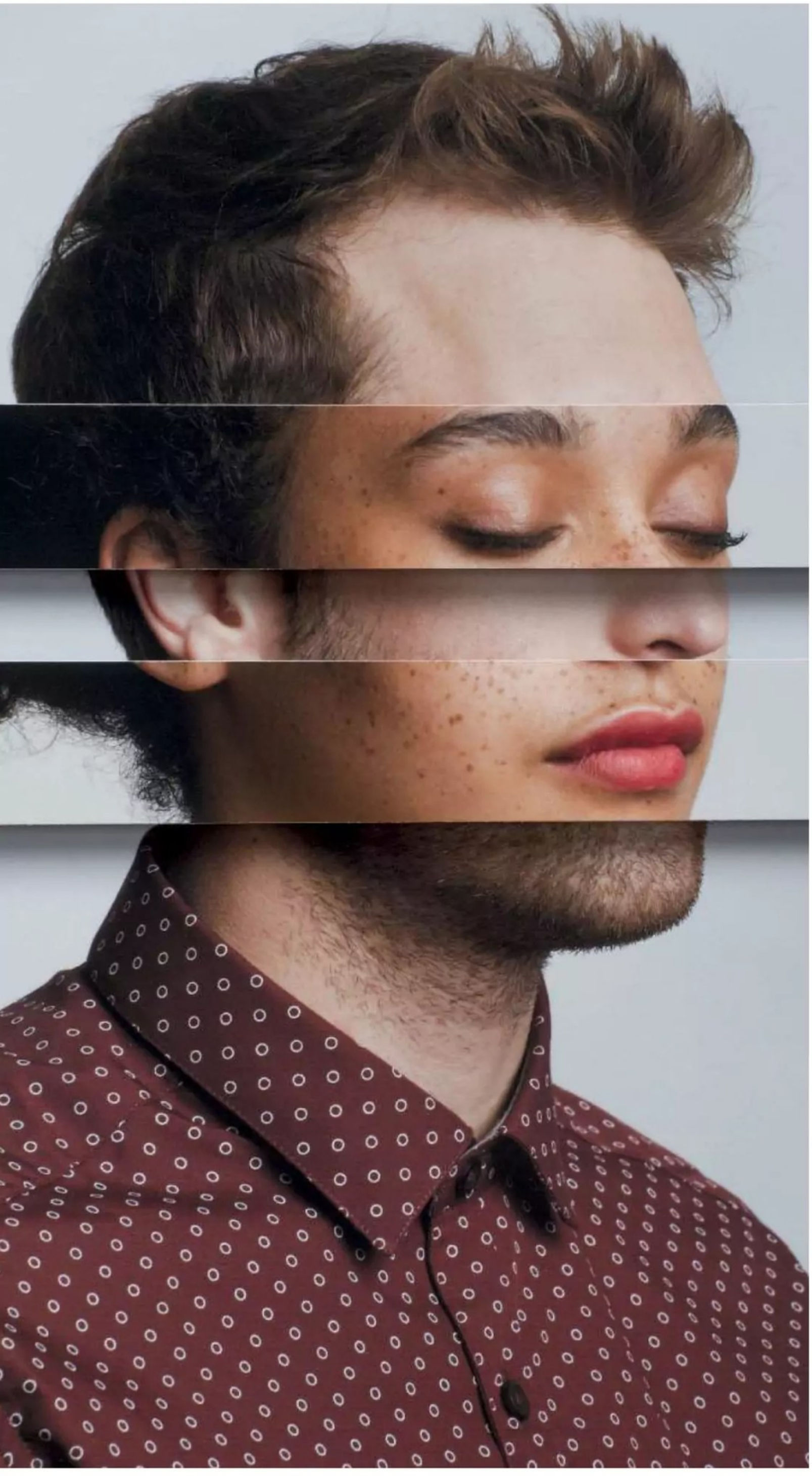
L'IA entretient les vieux schémas sexistes

Une certaine vision du genre a donc influencé la recherche sur le sexe. Un cas unique ? Non : l'idée que le masculin est supérieur se retrouve jusque dans l'étude des passereaux. Chez la plupart des oiseaux de ce groupe, les chanteurs sont des mâles. Le chant leur permet à la fois de défendre leur territoire et d'attirer les femelles. *« Mais dans les espèces où les deux sexes chantent, on dit que la femelle crie ! »*, s'insurge Jean-Louis Vercher. Ces dernières sont ainsi moins étudiées que leurs homologues mâles, quand bien même la fonction de leur chant n'est pas différente. Et qui s'intéresse au chant des oiseaux femelles ? Plutôt des femmes… 60 % des chercheurs sur le sujet sont des chercheuses, alors qu'elles ne représentent que 40 % de la communauté globale. *« Ce qui influence aussi la manière dont on pose les questions de sciences »*, conclut le biologiste.

ISM UMR 7287

« DE NOMBREUSES THÉORIES SONT CONSTRUITES SUR LA SUPPOSÉE SUPÉRIORITÉ DES HOMMES. C'EST CE QU'ON APPELLE L'ANDROCENTRISME »

Jean-Louis Vercher, neurophysiologiste, co-président du Comité parité égalité du CNRS

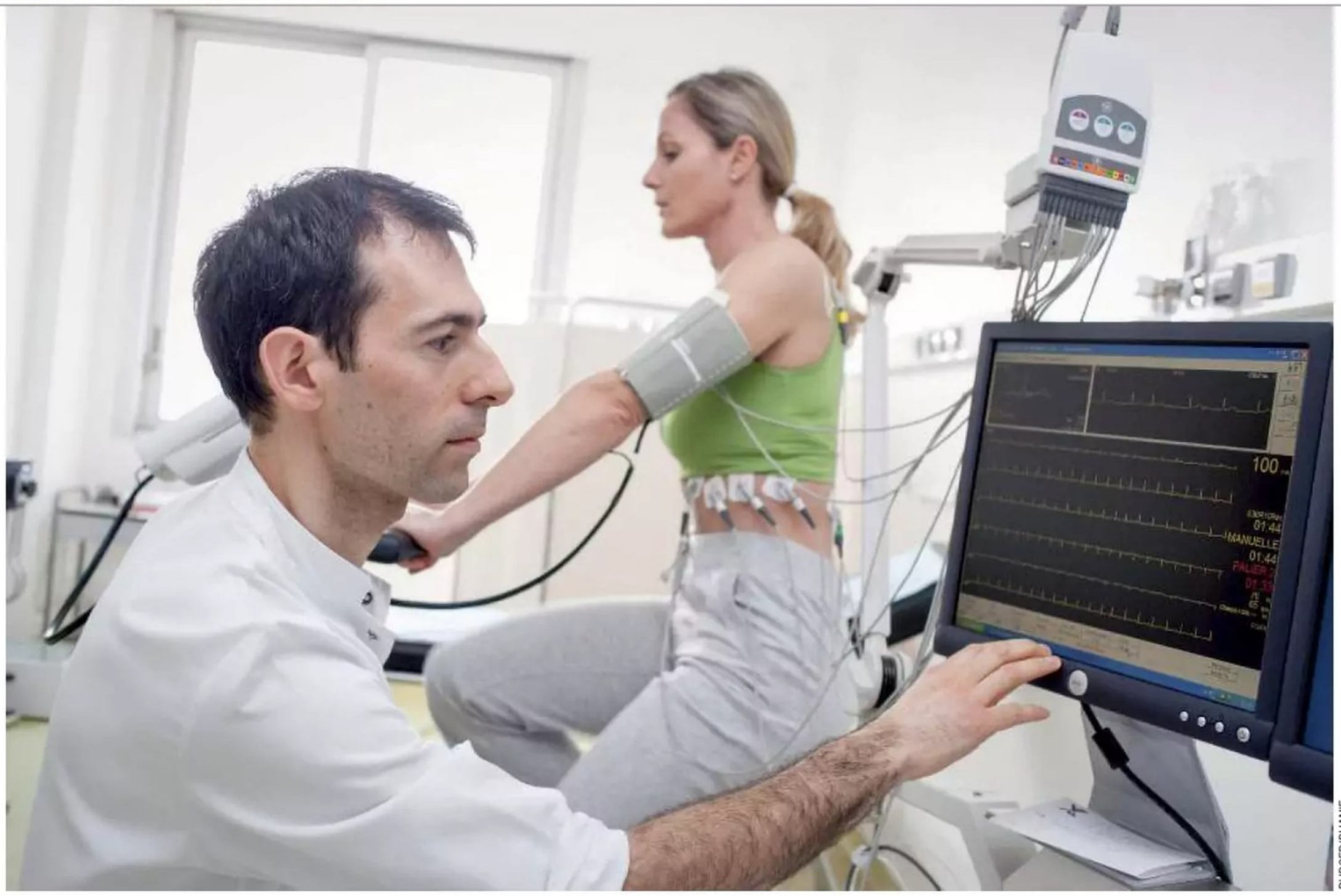


GETTY IMAGES

Tenir compte de la notion de genre est donc indispensable si l'on veut comprendre le monde… mais aussi si l'on entend le changer. C'est ce qu'ont montré, dans un tout autre domaine, les recherches de Timnit Gebru, qui travaillait sur les questions d'éthique des intelligences artificielles (IA) chez Google avant d'être licenciée en 2020. Probablement parce qu'elle menait des recherches sur les risques environnementaux et sociologiques associés au développement des principaux algorithmes de traitement du langage. Selon elle, la lutte contre le racisme et le sexisme en ligne est entravée par le fait que l'IA doit s'entraîner sur de très gros volumes de textes, notamment ceux, très nombreux, banalisant les propos discriminatoires. Les modèles d'IA ne sont pas en mesure d'intégrer les nouvelles normes culturelles. Pis : ils entretiennent les schémas rétrogrades, comme l'illustrent les voix principalement féminines des IA d'assistance. Car, c'est bien connu, on n'est jamais mieux servi que par une femme…

L'entrepreneur de la tech : masculin, blanc et américain

Et comme pour l'étude des passereaux, on observe que ces biais de genre sont le reflet du milieu qui les développe. Prenons l'archétype de l'entrepreneur de la tech : masculin, blanc et américain. Pourtant, il existe des femmes dans ce secteur, et certaines ont même de beaux succès. Connaît-on seulement le nom de Susan Wojcicki, PDG de YouTube jusqu'en février 2023 ? Ces représentations ont des conséquences sonnantes et trébuchantes. Une étude menée dans le cadre du projet européen Gender-Net Plus montre que les entrepreneuses de la tech obtiennent en moyenne moins de capitaux de la part des investisseurs que leurs congénères masculins, à projet équivalent. Les chercheurs ignorent si ce choix est implicite ou non, ◆◆◆



BURGER/PHANIE

Alors que les hommes meurent davantage de cancer, les maladies du cœur et des vaisseaux sanguins constituent la principale cause de décès des femmes. Pourtant, après un infarctus du myocarde, seule une femme sur cinq, contre un homme sur trois, a accès à des séances de réadaptation cardiovasculaire.

◆◆◆ mais la valeur financière d'un entrepreneur de la tech s'avère, de fait, supérieure à celle d'une entrepreneuse. Qu'il s'agisse d'oiseaux ou d'algorithmes, un milieu peu favorable aux femmes produit des résultats peu favorables aux femmes.

Les cours d'école, lieux prioritairement masculins

« *Pour mesurer ces effets liés aux représentations de genre, on a besoin de recherches en sciences humaines et sociales* », souligne Élisabeth Kohler, historienne et directrice de la Mission pour la place des femmes du CNRS. En explicitant l'impact du genre, ces études révèlent notamment sous un nouveau jour nos espaces quotidiens, même les plus banals, comme les pistes cyclables. Le géographe Yves Raibaud a mené une étude sur le sujet après une commande de la métropole de Bordeaux. Il montre que seules 38 % des cyclistes sont des femmes. Elles racontent de fréquentes réflexions, moqueries, sifflets, comportements sexistes ou misogynes de la part d'hommes. Elles préfèrent les trajets sur des pistes éclairées la nuit et séparées de la circulation des véhicules à moteur, par peur des incivilités et des agressions. « *On voit comment les femmes évitent certains trajets pour contourner des espaces inamicaux* », souligne Mathieu Arbogast, sociologue du CNRS.

D'autres lieux ont été analysés eux aussi comme moins favorables aux femmes, tels les cours des écoles ou les équipements de sport des prisons. La maison d'arrêt de Seysses, près de Toulouse, dont un des quartiers est destiné aux femmes, dispose d'équipements sportifs qui s'avèrent réservés en priorité aux hommes. Globalement, les femmes détenues y prennent plus de poids que les prisonniers masculins, et développent davantage de troubles anxiodépressifs sévères au cours de l'incarcération.

La représentation du genre influence aussi la santé. Par exemple, la médecine a longtemps considéré le risque cardiovasculaire comme l'apanage des hommes. Pourtant, si la probabilité de survenance d'une maladie du cœur est plus faible chez les femmes de moins de 55 ans que chez les hommes du même âge, l'écart se réduit en vieillissant. Ainsi, les maladies cardiovasculaires constituent, dans l'Hexagone, la principale cause de décès des femmes de plus de 65 ans. Plus généralement, en France, 56 % des femmes en meurent, contre 46 % des hommes. Elles sont donc plus vulnérables à ces pathologies, sans qu'on en comprenne les mécanismes. On sait cependant que sexe et genre s'entremêlent. Ce qu'oublient souvent les questionnaires de dépistage, qui ne mentionnent pas les principaux fac-

Bérangère Abou et Hugues Berry (dir.), *Sexe et genre,* Éditions matériologiques 2019

Podcast de Victoire Tuaillon « Les couilles sur la table », produit par Binge Audio

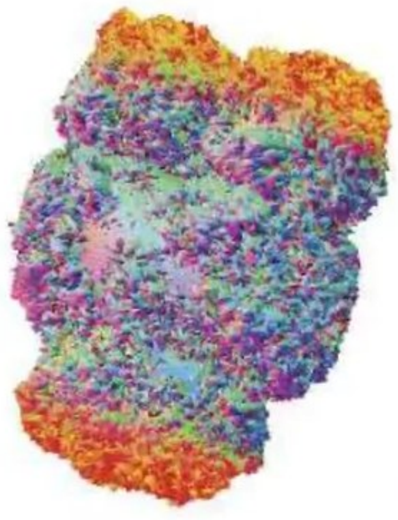
teurs de risque chez les femmes, comme la charge familiale, la discrimination au travail, le harcèlement moral ou les violences.

Aucune corrélation entre la testostérone et l'autisme

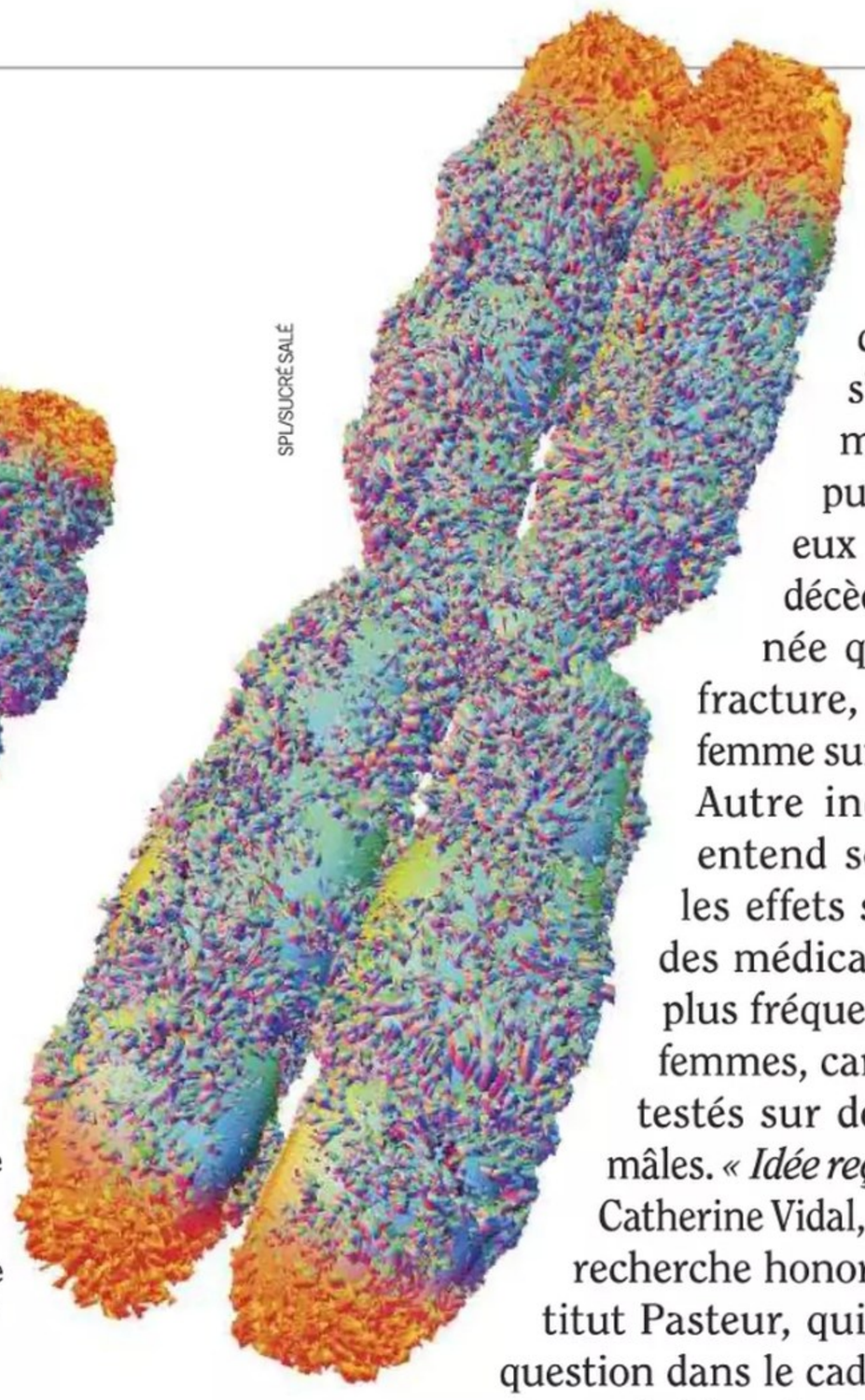
Le même constat existe pour l'autisme. À la fin des années 1990, une théorie explique les troubles du spectre autistique comme l'expression d'un « fonctionnement extrême du cerveau masculin », comprenez que des traits « masculins » du cerveau seraient exacerbés. Il faut savoir que pour ses promoteurs, au cours du développement du fœtus, la testostérone rendrait les cerveaux masculins plus aptes à l'analyse des systèmes complexes et donc aux mathématiques. L'absence de cette hormone chez les filles expliquerait leurs compétences sociales et leur attention aux autres. Le repli sur soi, les difficultés de communication et les faibles signes d'empathie chez les enfants autistes résulteraient de ce déséquilibre en faveur des compétences attribuées à l'homme. D'ailleurs, ne diagnostique-t-on pas plus d'autisme chez les garçons que chez les filles ?

Mais en 2016, les travaux d'une équipe de Cambridge, au Royaume-Uni, démontent le mythe. Ils montrent qu'il n'existe aucune corrélation entre le taux de testostérone avant la naissance et les traits autistiques. Entretemps, cependant, le cadre théorique a orienté les méthodes de dépistage, conçues uniquement à partir d'observations chez les garçons. À cela s'ajoutent les normes sociales, qui influencent la perception des professionnels. Le repli sur soi pourra être interprété chez les filles comme de la timidité ; moins souvent chez les garçons, à qui l'on prête généralement une attitude plus expansive. Cela produit un retard de diagnostic des filles autistes. Une enquête américaine a mesuré que sur 14 000 enfants présentant un trouble du spectre autistique, 37 % des garçons avaient été détectés dès le plus jeune âge contre seulement 18 % des filles. Et ce biais de dépistage entrave toujours les analyses épidémiologiques concernant l'autisme.

Ces représentations erronées ne nuisent pas qu'aux femmes. Les hommes aussi sont mal pris en charge pour certaines pathologies, considérées comme « féminines ». C'est le cas de l'ostéoporose. Un tiers des fractures liées à cette pathologie surviennent chez les hommes âgés. Et les conséquences s'avèrent dramatiques, puisque parmi eux un sur trois décède dans l'année qui suit une fracture, contre une femme sur cinq.



SPL/SUCRÉ SALÉ



Pendant des décennies, les biologistes ont étudié les différences hommes-femmes en partant du présupposé que le masculin était supérieur. Le chromosome Y était supposé être un plus.

Autre inégalité : on entend souvent que les effets secondaires des médicaments sont plus fréquents chez les femmes, car ils seraient testés sur des animaux mâles. *« Idée reçue »*, répond Catherine Vidal, directrice de recherche honoraire à l'Institut Pasteur, qui a étudié la question dans le cadre d'un rapport pour le Haut Conseil à l'égalité entre les femmes et les hommes. Elle y montre que si les femmes déclarent plus d'effets secondaires, elles n'en souffrent pas plus : simplement, elles font davantage remonter l'information. La chercheuse conclut : *« Rien ne permet d'affirmer que les médicaments causent en moyenne plus d'effets indésirables chez les femmes parce qu'ils sont inadaptés à leur biologie. »*

Tout n'est donc pas imputable aux biais de genre. Les débusquer est crucial pour la recherche scientifique. Celle-ci peut commencer par… ses propres pratiques de recrutement. *« Il existe des biais de genre implicites dans nos comités d'évaluation »*, reconnaît Mathieu Arbogast. Des travaux du CNRS ont montré qu'en 2019, environ un jury sur deux chargé d'évaluer les candidatures aux postes de directeur ou directrice de recherche nie ou minimise l'existence de ces biais en défaveur des femmes. Mais lorsque ceux-ci sont explicitement formulés, les femmes promues sont proportionnellement plus nombreuses. Ça va mieux en le disant ?

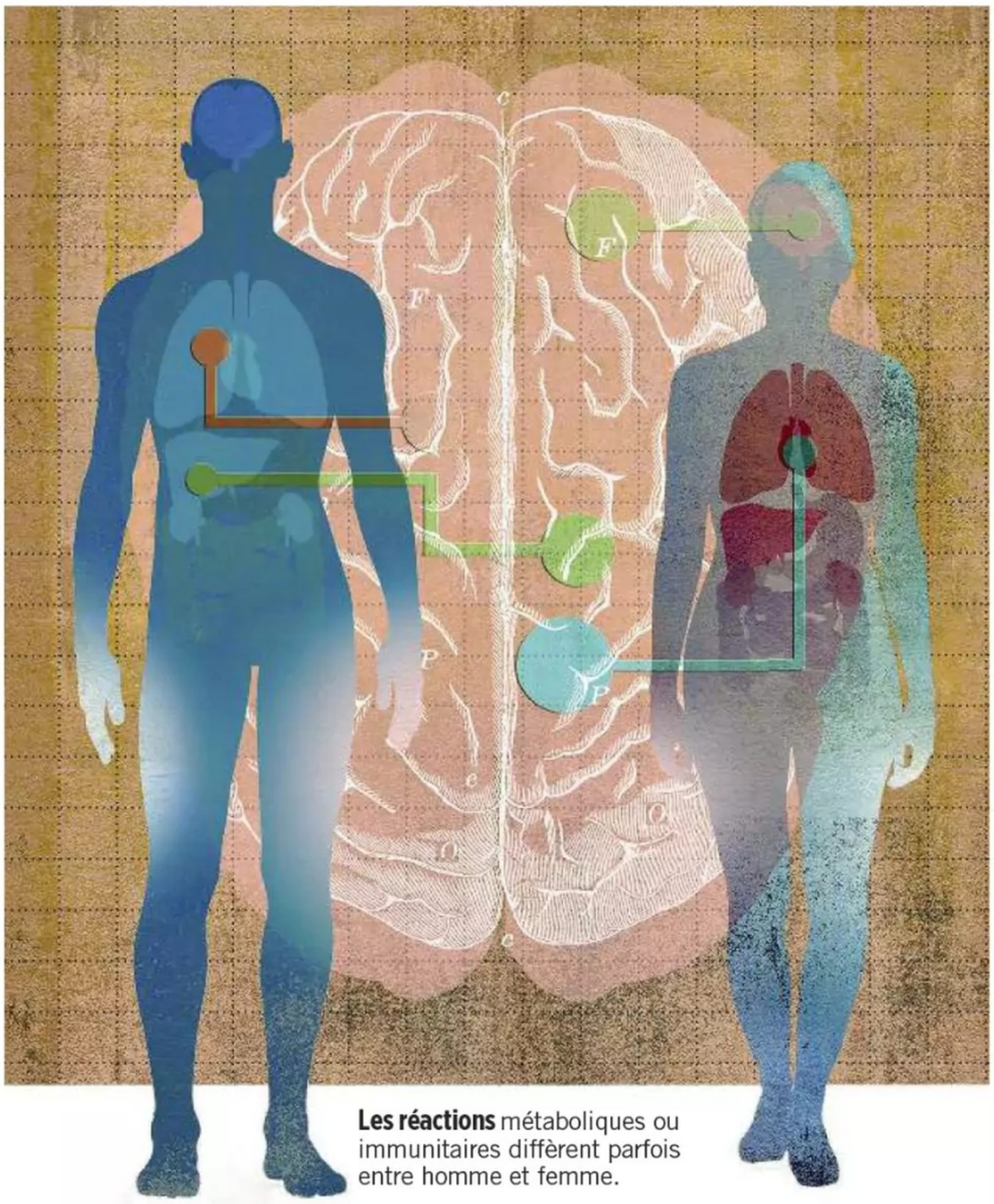
AGNÈS VERNET

D. GOUPY/SIGNATURES

« RIEN NE PERMET D'AFFIRMER QUE LES MÉDICAMENTS CAUSENT PLUS D'EFFETS INDÉSIRABLES CHEZ LES FEMMES PARCE QU'ILS SONT INADAPTÉS À LEUR BIOLOGIE »

Catherine Vidal, directrice de recherche honoraire à l'Institut Pasteur

EN BREF



ROY SCOTT/SPL/SUCRÉSALÉ

Les réactions métaboliques ou immunitaires diffèrent parfois entre homme et femme.

STÉRÉOTYPES

Le cerveau, organe sans sexe

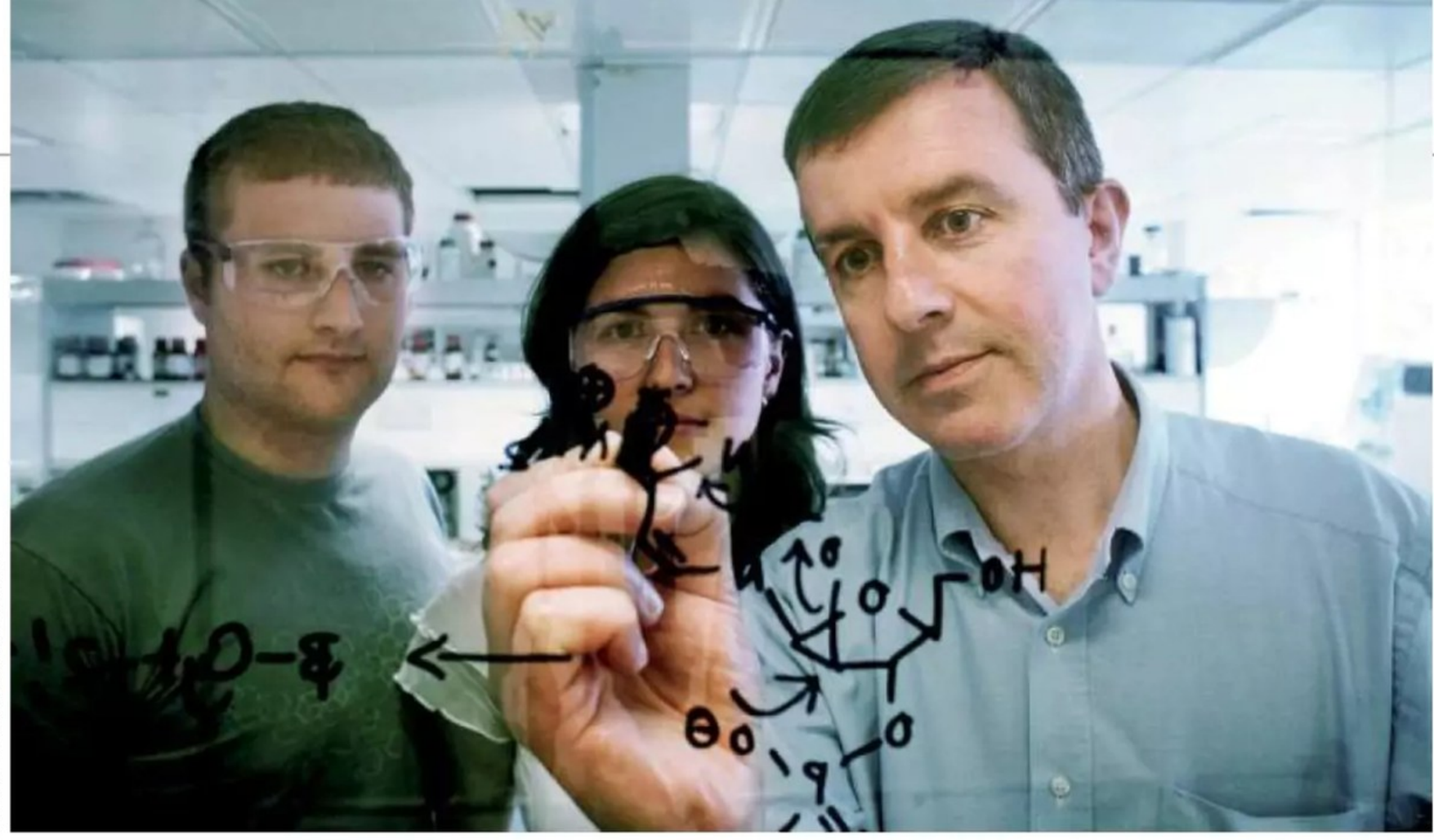
Taille, organes sexuels, pilosité, voix… les différences entre les femmes et les hommes ne passent pas inaperçues. Des milliers de publications scientifiques portent sur le dimorphisme sexuel chez l'humain, c'est-à-dire l'expression biologique de ces disparités. La grande majorité date… des vingt dernières années. Est-ce à dire que ces dissemblances posent encore question ? Ces études portent souvent sur les variations de risques face aux maladies, ou de réponses des systèmes métaboliques ou immunitaires. Certaines ont ainsi tenté de comprendre pourquoi les hommes semblent plus vulnérables au covid-19 que les femmes. La faute aux nuances dans la réponse inflammatoire et au nombre de protéines de surface que le virus utilise pour infecter une cellule, comprend-on désormais.

Mais si la recherche mesure les conséquences des différences entre les sexes, elle montre aussi que, parfois, on en voit là où il n'y en pas. *« On a laissé croire que les cerveaux des filles et des garçons diffèrent biologiquement »,* explique Catherine Vidal, neurobiologiste, directrice de recherche honoraire à l'Institut Pasteur et membre du Haut Conseil pour l'égalité entre les femmes et les hommes. Les garçons seraient naturellement plus doués pour l'abstraction ou les maths que les filles, plus pragmatiques. *« Autrement dit, un individu serait défini par la naissance. C'est du déterminisme. Une vision très prisée par les milieux conservateurs. Elle est au cœur du sexisme et du racisme »,* analyse la spécialiste. Qu'en dit la science ? *« En réalité, la recherche accumule toujours plus de données sur la plasticité cérébrale. Ce sont les expériences vécues, tout comme les normes sociales, qui modifient le cerveau »,* poursuit la chercheuse. Ainsi, si, dans les études, les hommes réussissent mieux les tâches impliquant la mémoire spatiale et les femmes dominent les tests de compétence verbale, c'est le produit de l'éducation et des pressions sociales, une affaire non pas de sexe mais… de genre *(lire p. 26)*. *« Les notions de genre et de sexe sont indissociables chez l'humain. L'environnement modifie le cerveau,* insiste Catherine Vidal. *On peut désormais comparer des milliers de cerveaux… et pourtant on ne voit pas de différence. En réalité, la diversité d'un individu à l'autre est telle que rien de saillant ne distingue un cerveau d'homme de celui d'une femme. Si ce n'est d'infimes variations dans l'hypothalamus, la petite glande contrôlant notamment le système reproducteur. »* On mesure aussi qu'en moyenne le cerveau des hommes est 11 % plus grand que celui des femmes, ce qui semble lié à la taille globale. Qu'en déduit la science ? Rien… Cette variation n'explique aucune différence entre les genres. En termes de cognition, la taille ne compte pas.

AGNÈS VERNET

EDUCATION

Dissiper le mythe des maths



LAURENT VILLERET / PINK / SAIF IMAGES

L'inquiétude naît dans les années 2000 : la France constate alors une baisse des effectifs dans les filières scientifiques à l'université. Le résultat, selon le sociologue Bernard Convert, d'un transfert au profit de filières technologiques plus professionnalisantes telles l'informatique ou les sciences de l'ingénieur.
Plus récemment, la réforme du baccalauréat (avec le choix de trois spécialités en première, puis de deux en terminale) a conduit de nombreux élèves à abandonner les mathématiques dès la classe de première. *« Si cette réforme n'a rien changé à l'orientation des élèves issus des classes sociales supérieures,* observe la sociologue Margot Déage*, les mathématiques, présentées comme une spécialité d'excellence, ont été délaissées par les élèves des milieux plus populaires, ainsi que par les filles. »*
*« Bien des élèves pensent qu'il faut être bon en maths pour être bon en sciences, a*ppuie Clémence Perronnet, sociologue au centre Max-Weber. *On a érigé cette discipline comme la mesure de l'intelligence scolaire. »*
Cependant, ces chiffres ne montrent pas de désaffection des jeunes lycéens pour les sciences en général, puisque la combinaison de spécialités « maths et physique » est choisie par 20 % des élèves au niveau national, dont un tiers de filles. *« Même si l'on a fait des progrès, nos modèles d'éducation poussent encore les filles à être modestes,* reprend Clémence Perronnet. *Leur moindre inscription en sciences était prévisible. »*
Les jeunes Français obtiennent de très mauvais scores en mathématiques dans les études internationales, largement derrière le Japon ou les États-Unis. De plus, *« les enquêtes successives menées en France vont dans le sens d'une dégradation sensible du niveau des élèves »*, constate Colombe Saillard, doctorante au Collège de France. Démystifier les mathématiques serait peut-être un premier pas vers un plus fort engouement des jeunes pour les sciences.

VALÉRIE HANDWEILER

Avoir la bosse des maths n'est pas un prérequis pour être bon en sciences. Cette matière reste pourtant considérée comme une spécialité d'excellence, réputée donner un brevet d'intelligence.

PARITÉ

FEMMES DE SCIENCES, UNE CARRIÈRE CONTRARIÉE

Le chiffre est édifiant : depuis sa création, en 1901, le prix Nobel n'a récompensé que 26 femmes en physique, chimie ou médecine, soit 3 % des lauréats de ces disciplines. Pourtant, les femmes ont contribué, de manière parfois décisive, à l'avancée des sciences. Exemple avec l'astrophysicienne britannique Jocelyn Bell, qui découvrit le premier pulsar. En 1974, sa découverte fut récompensée par le Nobel de physique, attribué à… Antony Hewish, son directeur de thèse. Certes, la chercheuse a été « réhabilitée » en 2018, et depuis vingt ans, le nombre de femmes distinguées pour leur recherche a augmenté.

SPL / AKG IMAGES

Si Jocelyn Bell a découvert les pulsars, c'est son directeur de thèse qui a obtenu le Nobel…

Mais la situation n'évolue que lentement. En France, les femmes représentaient, en 2016, 28 % des effectifs de chercheurs. Un chiffre équivalant au nombre d'étudiantes inscrites en formation d'ingénieur ou en sciences à l'université. Et partout dans le monde, de nombreux biais de genre persistent, ce que rappellent deux ouvrages parus en 2023. Dans *Equity for Women in Science*, Cassidy Sugimoto et Vincent Larivière montrent que les femmes ont publié 20 % d'articles de moins que les hommes entre 2008 et 2020. Collaborations, mobilité ou financements se font aussi à leur désavantage. En outre, plus la probabilité que la revue soit mentionnée est élevée, moins elles sont citées. Dans *Not Just for The Boys,* d'Athene Donald, on apprend par ailleurs que 20 % des femmes scientifiques et ingénieures envisageraient de quitter leur domaine, victimes de neurosexisme – croyance selon laquelle le cerveau est sexué –, de harcèlement, ou du sentiment d'occuper une place qu'elles ne méritent pas. Quelles solutions ? Renforcer les alliances féminines et dénoncer les abus. Et avant tout, valoriser les femmes de sciences contemporaines.

CAROLINE DEPECKER

Un UNIVERS redessiné

Des images du Cosmos comme on n'en a jamais vu, des observations qui précisent l'histoire de l'Univers, des mesures qui pourraient – peut-être ! – contredire les théories d'Einstein : le télescope James Webb tient toutes ses promesses ! Mais s'il nous emmène toujours plus près du Big Bang, notre proche périphérie n'est pas oubliée : Mars nous réservera toujours des surprises...

JWST/NASA

Observée en infrarouge par le James Webb Space Telescope, l'étoile massive WR 124 dans le nuage de gaz et de poussières qu'elle a éjectés, prélude à sa probable explosion en supernova.

> ASTRONOMIE

Au plus près du Big Bang avec le James-Webb

Univers lointain, premières galaxies, exoplanètes : grâce à sa capacité à observer une lumière invisible à nos yeux, l'infrarouge, le télescope spatial géant, lancé fin 2021, a déjà livré une stupéfiante moisson de découvertes. De quoi, peut-être, réécrire l'histoire du Cosmos.

C'est le télescope spatial de tous les superlatifs. Le plus gros, avec son miroir segmenté et pliable de 6,5 m de diamètre, qui a été déployé dans l'espace – une prouesse technologique; un développement qui aura duré près de vingt ans jusqu'au lancement par Ariane 5 le 25 décembre 2021; un coût avoisinant les 10 milliards de dollars, ce qui en fait l'un des instruments scientifiques les plus chers de l'Histoire. Toutes choses qui expliquent sans doute que ce soit Joe Biden en personne, le président des États-Unis, qui ait le premier révélé des images du télescope spatial James-Webb (JWST), le 11 juillet 2022 : une plongée époustouflante dans l'Univers lointain, des milliers de galaxies et de nébuleuses révélées avec un luxe inouï de détails.

L'engin, qui porte le nom d'un dirigeant de la Nasa des années 1960 et a été développé par cette institution avec la participation des agences spatiales européenne et canadienne, s'est ainsi permis de voler la vedette à Hubble. Dans l'espace depuis plus de trente ans, le mythique télescope collectionne lui aussi les images spectaculaires. Mais la comparaison s'arrête là. Car JWST n'est pas son successeur. Quand Hubble observe essentiellement dans le domaine visible de la lumière, JWST voit dans l'infrarouge. Un domaine que nos yeux ne peuvent percevoir, mais qui recèle bien des phénomènes et des objets cachés, à toutes les échelles de l'Univers, et sur lequel reposent tous les objectifs scientifiques de l'instrument.

Premier d'entre eux: voir au plus près du Big Bang. Grâce à son large miroir, le télescope pourra observer des objets très lointains. Or, voir loin en astronomie, c'est remonter le temps. Lorsque nous captons l'image d'une galaxie très lointaine, sa lumière s'est propagée pendant des milliards d'années, et on la voit donc telle qu'elle était alors.

C. PEUS, UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY

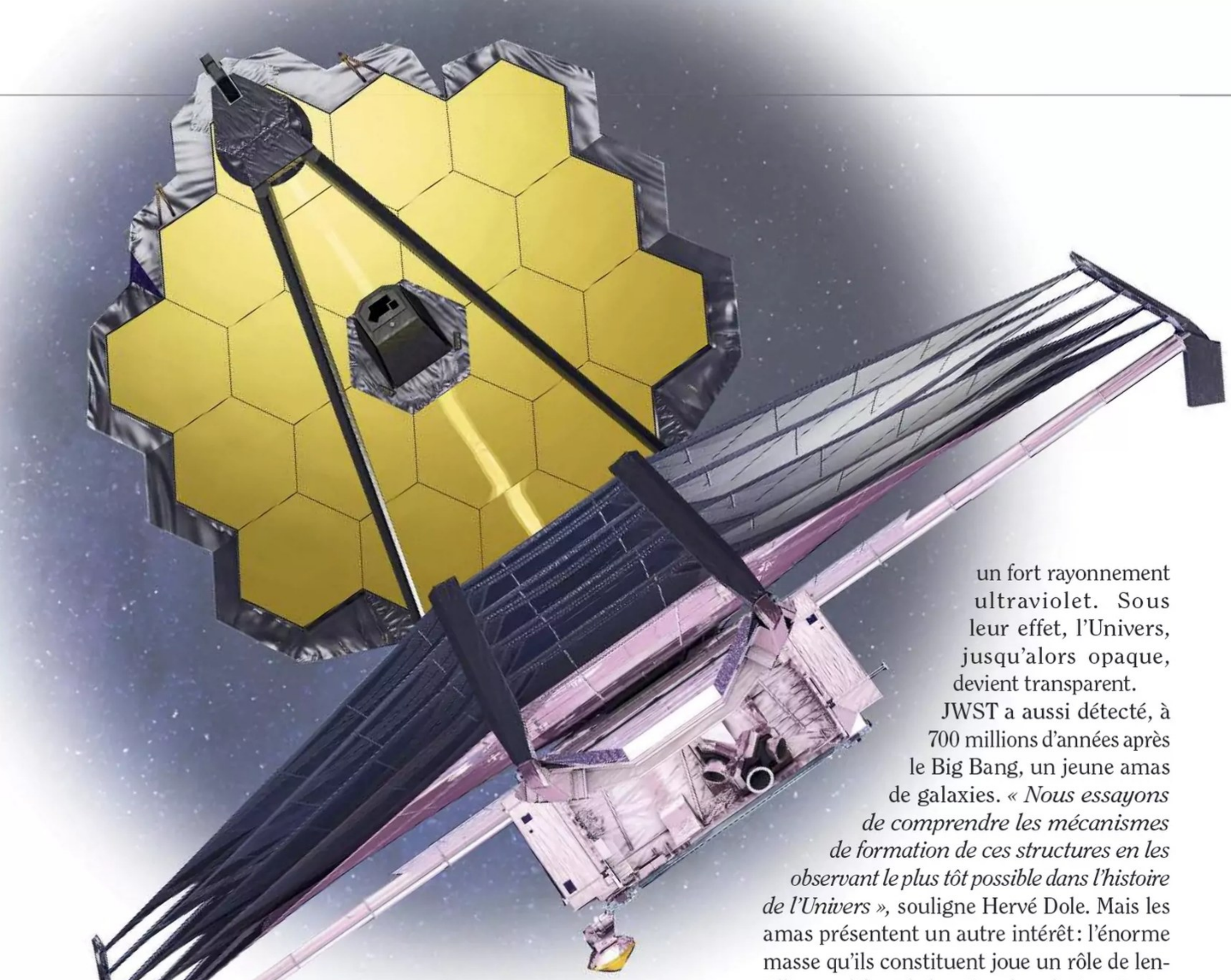
« IL N'EST PAS ÉTONNANT QUE NOS HYPOTHÈSES SOIENT MALMENÉES PAR L'ARRIVÉE D'UN INSTRUMENT AUSSI PERFORMANT»

Hervé Dole,
astrophysicien,
professeur à l'université
Paris-Saclay

« Avec l'observatoire spatial Planck, on a pu caractériser le rayonnement "fossile" émis 380 000 ans après le Big Bang », rappelle Hervé Dole, astrophysicien et professeur à l'université Paris-Saclay. À cette époque, la matière et la lumière, jusqu'alors intimement liées, se séparent. *« Avec Hubble, on a observé des galaxies telles qu'elles étaient environ 1 milliard d'années plus tard. Entre les deux, il y a un fossé que le James-Webb va combler »*, explique-t-il. Les observations l'ont démontré: l'Univers est en expansion. Il entraîne avec lui toutes les galaxies. Conséquence: la longueur d'onde de leur lumière est comme étirée. Si la lumière des galaxies voisines de notre Voie lactée reste dans le domaine visible, celle des galaxies les plus lointaines se retrouve dans l'infrarouge. JWST accède ainsi à des galaxies plus anciennes que celles vues par Hubble ou même par Spitzer, autre télescope spatial infrarouge de la Nasa.

Une molécule à l'origine de la chimie des étoiles

Dès les premières observations, le télescope spatial géant a pulvérisé les records en découvrant une galaxie telle qu'elle était 320 millions d'années à peine après le Big Bang. L'Univers, né il y a 13,8 milliards d'années, était encore tout jeune. Plus étonnant encore: il a repéré six galaxies à peine plus récentes – 500 à 700 mil-



JWST

Le James-Webb explore l'Univers dans l'infrarouge, une longueur d'onde que nous ne pouvons voir mais que capture l'or qui recouvre son miroir. C'est ainsi qu'il a découvert des paysages vieux de plus de 13 milliards d'années, peuplés de galaxies. Il parviendra même à obtenir des images des toutes premières à s'être formées dans l'Univers, 180 millions d'années après le Big Bang.

lions d'années après le Big Bang – mais de masse apparemment très élevée, signe qu'elles contiennent déjà beaucoup d'étoiles. Une découverte qui a fait le buzz. Deux équipes de scientifiques ont en effet annoncé très rapidement – et prématurément – qu'elle ébranlait les fondations du « modèle lambda CDM ». Autrement dit, la description actuelle de notre Univers établi par la théorie et les observations. *« On n'attendait pas une formation d'étoiles aussi tôt. Mais il n'est pas étonnant que nos hypothèses soient malmenées par l'arrivée d'un instrument performant*, tempère Hervé Dole. *Grâce au JWST, nous pourrons mieux comprendre la physique des galaxies et améliorer ainsi notre modèle. »*

Mais le James-Webb ne remontera pas jusqu'au Big Bang. *« Nous pourrons accéder à l'époque de la réionisation, autour de 180 millions d'années »*, précise l'astrophysicien. C'est le moment où naissent les premières galaxies. Leurs jeunes étoiles très chaudes émettent un fort rayonnement ultraviolet. Sous leur effet, l'Univers, jusqu'alors opaque, devient transparent.

JWST a aussi détecté, à 700 millions d'années après le Big Bang, un jeune amas de galaxies. *« Nous essayons de comprendre les mécanismes de formation de ces structures en les observant le plus tôt possible dans l'histoire de l'Univers »,* souligne Hervé Dole. Mais les amas présentent un autre intérêt: l'énorme masse qu'ils constituent joue un rôle de lentille, amplifiant la lumière de galaxies situées très loin en arrière-plan. C'est l'effet de « lentille gravitationnelle », prédit par la relativité générale d'Albert Einstein. Ces galaxies apparaissent déformées. En mesurant cette déformation, on peut déduire la masse et la morphologie de l'amas. JWST a observé G165, un amas ayant un énorme effet de lentille, à environ 4,5 milliards d'années-lumière de la Terre. Il transmet la lumière de quantité de galaxies plus lointaines, dont au moins une comporte un point très brillant: une supernova! Dans notre Voie lactée, ces explosions d'étoiles en fin de vie sont rarissimes – la dernière remonte à 1987. *« Leur observation est utile pour mieux connaître la vitesse de l'expansion de l'Univers »,* précise Hervé Dole. En effet, leur luminosité initiale étant connue, elles jouent le rôle de « phares » permettant de mesurer leur distance et donc de calculer cette vitesse.

Beaucoup plus près de nous, JWST a pointé vers la nébuleuse d'Orion, dans la constellation du même nom, à 1340 années-lumière de la Terre. Objectif: comprendre comment se forment les étoiles. Là où les images ◆◆◆

L'art de colorier l'Univers

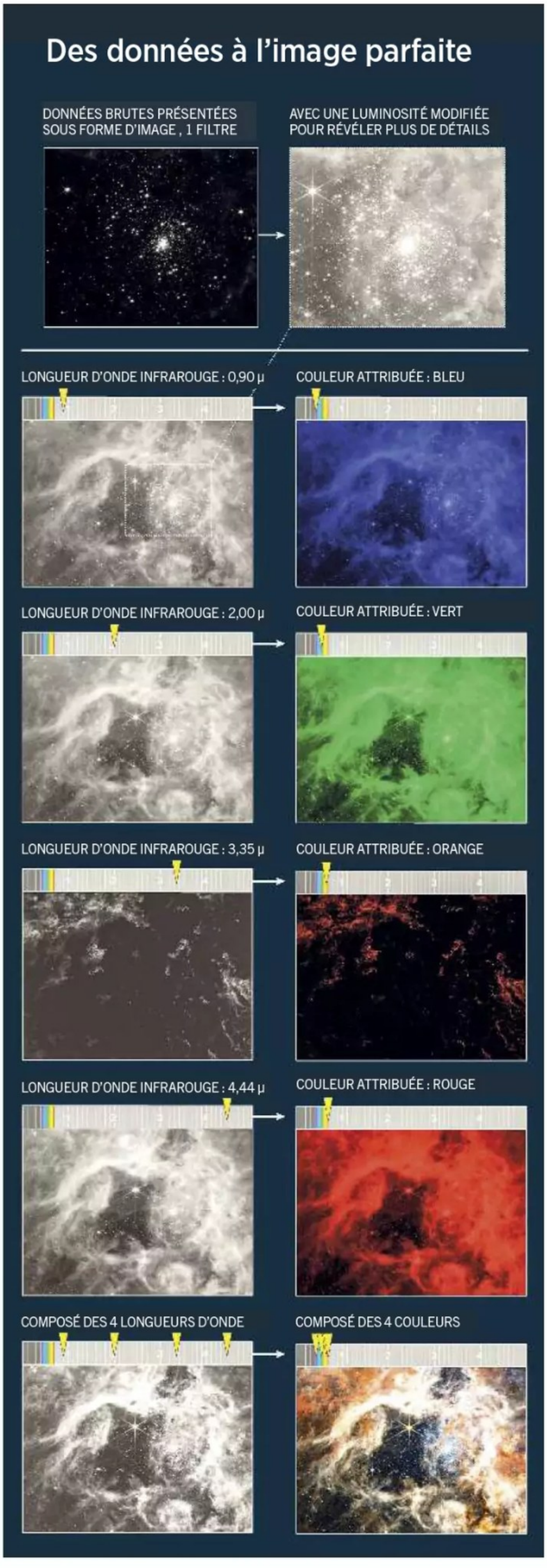
Les images du James-Webb sont inaccessibles à l'œil humain. Parce qu'elles sont prises dans l'infrarouge, mais aussi parce que la plupart des objets célestes qu'il observe émettent si peu de lumière que les capturer nécessite des heures de pose. Ce que les astronomes récupèrent, ce sont des pixels porteurs d'informations sur les objets visés : quantité de matière, composition chimique, température. Lorsqu'ils souhaitent mettre en évidence une molécule ou un flux de matière, ils utilisent un filtre approprié. Des couleurs sont ensuite appliquées aux images. Elles obéissent généralement à une convention, contraire à celle de nos robinets de salle de bains : le bleu est attribué aux objets les plus chauds, le rouge aux plus froids. Dans ce cadre, depuis Hubble, la Nasa a élaboré sa propre palette de couleurs, qu'elle utilise pour sa communication envers le public. Selon la chercheuse en culture visuelle Elisabeth Kessler, de l'université Stanford aux États-Unis, *« on peut rapprocher les images de Hubble et du James-Webb des œuvres des peintres américains du XIXe siècle, qui représentaient les grandes étendues sauvages. Et alors qu'il n'y a ni haut ni bas dans l'espace, les images diffusées sont toujours orientées pour suggérer un paysage. »* Le mythe de la « frontière », à l'origine des États-Unis, est aussi présent dans le Cosmos.

◆◆◆ de Hubble ne montraient que la surface, la vision infrarouge de JWST plonge dans les nuages de gaz et révèle dans toutes les directions de fins filaments de matière qui pourraient faciliter la formation d'étoiles. Les clichés montrent aussi des étoiles en formation, dans leur cocon de poussière, avec un disque de matière contenant des embryons de planètes. *« Par analogie, on pourra mieux comprendre comment s'est formé le Système solaire »*, explique Olivier Berné, de l'Irap (Institut de recherches en astrophysique et planétologie) de Toulouse, dont l'équipe a traité les premières images de JWST *(lire l'encadré ci-dessus)*.

Mais le télescope spatial fait plus que des images. Il est muni de deux spectrographes, Nirspec (pour l'infrarouge proche) et Miri (infrarouge moyen, développé pour partie en France), qui décomposent la lumière en « raies », correspondant à autant de longueurs d'onde. À chaque espèce chimique correspond une ou plusieurs longueurs d'ondes caractéristiques. C'est ainsi que l'équipe d'Olivier Berné a découvert dans cette même nébuleuse d'Orion le cation méthyle (CH_3^+). L'existence de cette molécule très simple était prédite depuis longtemps par les astrophysiciens, comme

Les instruments du James-Webb comportent 27 filtres, qui sélectionnent chacun une plage de valeurs différente du spectre infrarouge. Après avoir transformé en images les données brutes et enlevé les pixels parasites, les scientifiques attribuent à chaque filtre infrarouge une couleur de la gamme visible du spectre : les longueurs d'onde les plus courtes sont bleues, les plus longues, rouges. Puis ils additionnent ces résultats. Ici, les données issues d'une image filtrée à quatre longueurs d'ondes différentes sont agglomérées pour composer l'image en couleurs d'une nébuleuse.

Des données à l'image parfaite



JEN CHRISTIANSEN (GRAPHIC); NASA, ESA, CSA, STSCI AND WEBB ERO PRODUCTION TEAM (IMAGE SOURCE)

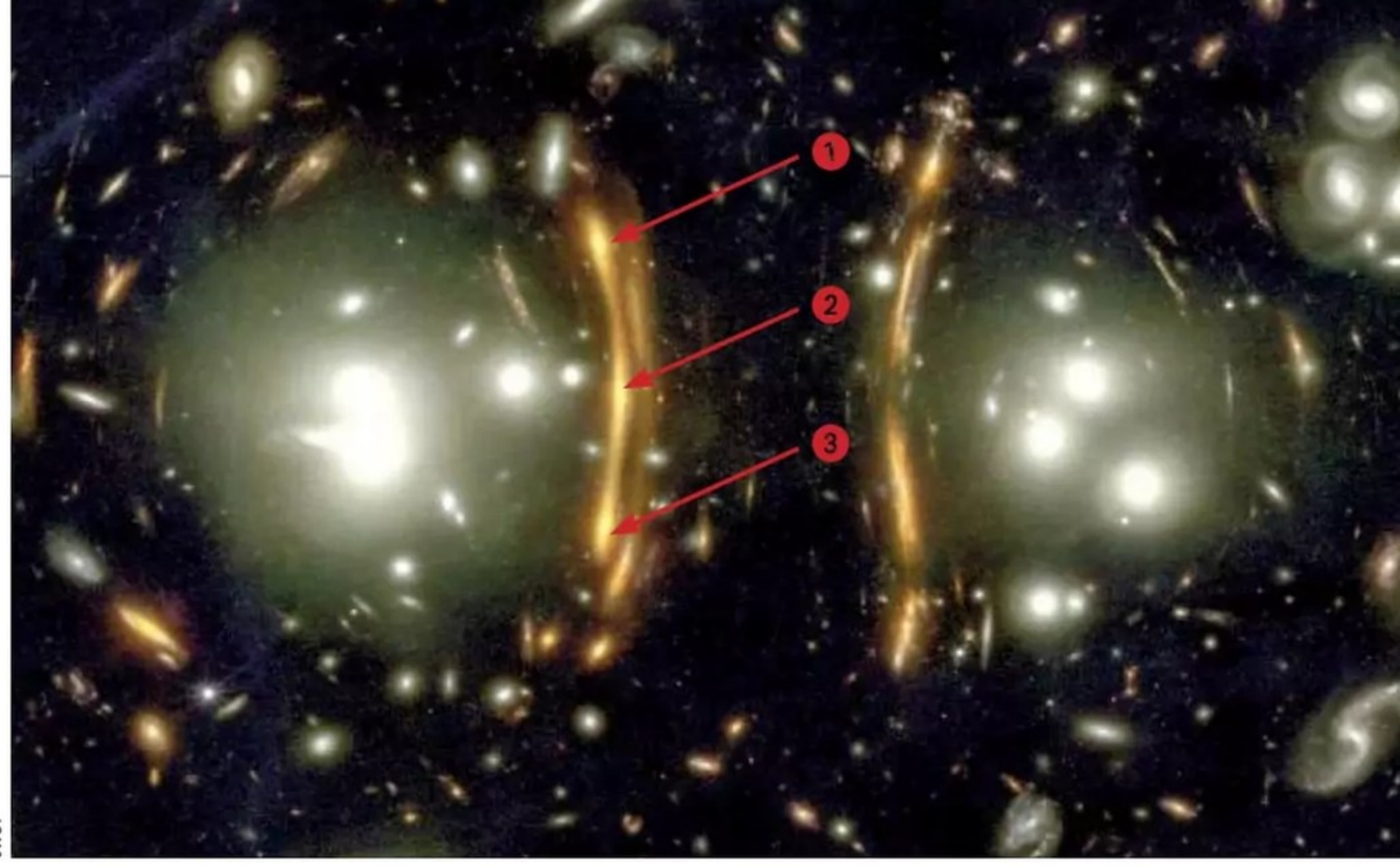
étant à l'origine de la chimie des étoiles, mais elle n'avait jamais été détectée. « *Il est important de comprendre comment la chimie se complexifie pour donner des molécules organiques, et finalement le vivant. CH3+ est au début de la chaîne* », souligne Olivier Berné.

Au cœur de l'atmosphère des exoplanètes

Encore plus fascinant: JWST va permettre d'en savoir plus sur les exoplanètes. On en recense aujourd'hui près de 5500, « jupiters chauds », « superterres » et autres « mininep-tunes ». JWST ne sera pas un découvreur. Mais grâce à ses spectrographes, il analysera leur atmosphère. Les exoplanètes naissent dans les disques de poussière autour des jeunes étoiles, plus ou moins loin de celles-ci. « *Les informations collectées permettront de savoir où et comment elles se sont formées* », explique Pierre-Olivier Lagage, astrophysi-cien au Commissariat à l'énergie atomique (CEA). JWST tire profit de ce que les astro-nomes appellent le « transit ». Lorsqu'une exoplanète passe devant une étoile, la lumière de cette dernière éclaire les molécules de son atmosphère, laissant dans le spectre qui en résulte une signature qui permet de les iden-tifier. Le James-Webb a déjà exploré l'atmos-phère de Wasp 39b, une exoplanète orbitant autour d'une étoile de la constellation de la Vierge, à 700 années-lumière de la Terre: « *On a découvert du CO_2, ce qui était prévisible,* précise Pierre-Olivier Lagage. *Mais aussi du dioxyde de soufre* (SO_2), *une surprise. Cette molécule témoigne d'une chimie à l'œuvre. Elle est fabriquée par l'action des rayonne-ments ultraviolets sur l'atmosphère.* »

Un système planétaire concentre tous les regards: Trappist 1, une étoile située à 40 années-lumière de la Terre, dans la constel-lation du Verseau. Pas moins de sept planètes tournent autour d'elle, toutes potentiellement rocheuses. JWST a déjà livré des informa-tions sur la planète Trappist 1b: « *Nous avons pu mesurer sa température, qui est de 503 K (environ 230 °C). Elle n'a probablement pas d'atmosphère, comme Mercure dans notre système solaire. Nous souhaitons observer les planètes de Trappist qui se trouvent dans la zone habitable de leur étoile* [là où de l'eau peut se maintenir à l'état liquide, *ndlr*], *mais cela demandera beaucoup de temps de téle-scope.* » Ces planètes ne ressemblent pas à la Terre, car Trappist est plus petite que le Soleil et beaucoup plus froide. Et elles sont 6 à 40 fois plus proches de leur étoile que notre planète de la nôtre. Le télescope spatial pourrait-il analyser l'atmosphère d'une planète en tout point semblable à la Terre, tournant autour d'une étoile jumelle du Soleil? « *Non,* répond sans détour Pierre-Olivier Lagage. *JWST n'est pas assez sensible. Il faudra envoyer dans l'espace plusieurs télescopes travail-lant ensemble, comme ceux du projet LIFE, à l'étude à l'Agence spatiale européenne.* » Et vient la question qui brûle les lèvres: com-ment détecter une manifestation de la vie dans l'atmosphère d'une exoplanète? « *Il faudrait pour cela savoir reconnaître une molécule caractéristique d'une activité biologique. Un gaz, l'ozone, qui sur Terre se forme à partir de l'oxygène produit par les micro-organismes, serait un bon candidat. Mais il peut aussi se former de manière purement chimique. Si l'on détectait quelque chose, il faudrait des années pour le confirmer.* »

En attendant, les scientifiques se bousculent pour accéder au télescope: il y a cinq ou six fois plus de demandes que de temps disponible. La durée théorique de sa mission est de cinq ans. Mais le lancement sans faute d'Ariane 5, qui a permis d'économiser le carburant du téles-cope spatial, repousse l'échéance à dix ans, peut-être beaucoup plus. Hubble lui-même, malgré ses trente-trois ans de service, n'a pas encore baissé le rideau. **JEAN-FRANÇOIS HAÏT**



JWST

L'un des phénomènes les plus fascinants de l'astrophysique est la lentille gravitationnelle : de même que, sur Terre, une lentille de verre dévie les rayons lumineux, déformant les objets placés derrière elle, dans le Cosmos, un corps massif courbe la lumière qui passe à proximité, et peut donner naissance à plusieurs images d'un objet situé derrière lui. Ici, la supernova Hope se découvre dans trois positions différentes (flèches rouges) grâce à l'amas de galaxies G165, qui sert de lentille.

Le site du James-Webb (en anglais) : webb.nasa.gov

PO LAGAGE

« LES INFORMATIONS COLLECTÉES PAR LE TÉLESCOPE PERMETTRONT DE SAVOIR OÙ ET COMMENT SE SONT FORMÉES LES EXOPLANÈTES »

Pierre-Olivier Lagage, astrophysicien au Commissariat à l'énergie atomique (CEA)

BRUNO LÉVY/DIVERGENCE

FRANÇOISE COMBES

Astrophysicienne, vice-présidente de l'Académie des sciences

« La Relativité générale pourrait être modifiée »

Matière noire introuvable, nouvelles images du Cosmos… Et si la théorie d'Einstein était incomplète ?

Nos connaissances sur l'histoire de l'Univers sont-elles certaines ?
Tout ce que nous savons des grandes étapes de sa formation est synthétisé dans ce que les astronomes appellent le modèle standard de la cosmologie, qui n'est pas à proprement parler une théorie, mais un outil de travail ajusté en fonction des observations des télescopes, et dont la construction est basée sur plusieurs hypothèses. Or l'une d'entre elles veut que la gravitation obéisse partout et en toutes circonstances aux lois définies par Albert Einstein dans sa théorie de la relativité générale. Les dernières avancées de la physique et de l'astronomie suggèrent que cela pourrait ne pas être le cas.

Comment les astrophysiciens en arrivent-ils à cette conclusion ?
Au milieu des années 1980, en mesurant le spectre de lumière de certaines galaxies dites spirales, ils ont mis en évidence une anomalie : les étoiles et le gaz situés à la périphérie de ces galaxies tournent plus vite que prévu. Pour expliquer ce phénomène, ils ont imaginé la présence dans l'Univers d'une forme de matière « exotique » indétectable à l'aide des télescopes classiques – la matière noire, dont ils ont tenté d'expliquer la nature à l'aide de diverses théories.
La plus connue prédisait qu'elle pourrait être faite d'hypothétiques particules « supersymétriques », appelées Wimps. Non seulement celles-ci n'ont jamais été détectées dans l'espace, mais on sait que les grands instruments tel le Grand Collisionneur de particules, le LHC du Cern à Genève, auraient dû parvenir à les mettre en évidence au cours de la dernière décennie, ce qui n'a pas été le cas. Les recherches conduites sur d'autres candidats, appelés « neutrinos stériles » ou « axions », n'ont, elles non plus, pas donné de résultats satisfaisants. D'où l'hypothèse actuelle voulant que la matière noire puisse ne pas exister. Et que les effets observés correspondent à une manifestation d'une forme de gravité « modifiée ».

Que serait cette gravité modifiée ?
Des régions comme le Système solaire ou la Voie lactée réunissent de grandes quantités de matière dans un petit volume. Elles correspondent à des parties denses de l'Univers, dont les fortes gravités obéissent en tout point aux lois de la relativité générale. Mais ailleurs dans le Cosmos, notamment à la périphérie des grosses galaxies ou au centre des galaxies naines – zones prétendument occupées par la matière noire –, c'est le vide qui domine. La gravité est faible et pourrait ne pas se comporter conformément aux prédictions d'Einstein. Sa théorie resterait valable, mais elle devrait être « modifiée » pour tenir compte de ces situations.
Là où les choses deviennent intéressantes, c'est qu'introduites dans le modèle standard de la cosmologie, ces nouvelles lois nous livrent un récit de l'histoire de l'Univers un peu différent. Notamment, elles réduisent le délai entre le Big Bang et l'apparition des premières galaxies massives. Or, c'est précisément ce que semble observer le télescope spatial James-Webb.

Des avancées sont-elles attendues concernant l'autre grand mystère de la cosmologie, l'énergie sombre ?
Effectivement, selon les estimations actuelles, l'Univers est constitué de 5 % de matière ordinaire, de 25 % de matière noire et de 70 % d'une énergie sombre dont on ne sait quasiment rien. Cette dernière, découverte en 1998 par l'observation de certaines supernovae, agit sur l'expansion que connaît l'Univers depuis le Big Bang, en l'accélérant. Et cela, depuis cinq milliards d'années. Pourquoi ?
La mission Euclid devrait nous en dire plus. Ce télescope spatial de l'ESA a été lancé en juillet 2023 avec l'objectif de relever dans une vaste portion du ciel les spectres et les images de pas moins de 12 milliards de galaxies de toutes époques. De quoi nous permettre de commencer à trancher entre les différentes hypothèses.

PROPOS RECUEILLIS PAR VAHÉ TER MINASSIAN

NIF

Le 30 juillet 2023, les scientifiques américains de la National Ignition Facility (NIF) ont atteint pour la seconde fois le seuil d'ignition de la fusion nucléaire.

PHYSIQUE

LA FUSION NUCLÉAIRE N'EST PLUS UNE UTOPIE

Fusionner la matière de sorte qu'elle libère plus d'énergie qu'on ne lui en a apporté. C'est la première condition pour exploiter une source d'énergie quasi inépuisable à l'échelle de l'humanité: l'hydrogène, dont la fusion – ou plus exactement, celle des noyaux de ses isotopes deutérium et tritium – produit de l'hélium... et de l'énergie.
Ce prérequis indispensable a enfin été satisfait en décembre 2022, puis en juillet dernier. Dans un laboratoire du Département américain de l'énergie (DOE), du combustible enfermé dans une petite capsule a fusionné et libéré au moins 1,5 fois plus d'énergie que celle-ci n'en avait reçu, le tout pendant quelques milliardièmes de seconde. C'est plus efficace que le ratio de 0,7 – mais sur une durée de cinq secondes – obtenu avec le JET en Grande-Bretagne en 2021. Cette machine à confinement magnétique enferme la matière échauffée à plus de 100 millions de degrés grâce à des aimants surpuissants. De son côté, le DOE utilise le confinement inertiel: 192 faisceaux laser très intenses bombardent simultanément le combustible. Si l'exploit américain est indiscutable, la route sera longue avant de concrétiser cette approche, puisqu'il a fallu 300 mégajoules (83 kWh) pour alimenter les lasers et produire *in fine* 3 MJ (0,83 kWh). Pour fournir de l'électricité ainsi, il faudra donc être... 500 fois plus efficace, et conduire dix fusions par seconde!

DENIS DELBECQ

MOLECULES

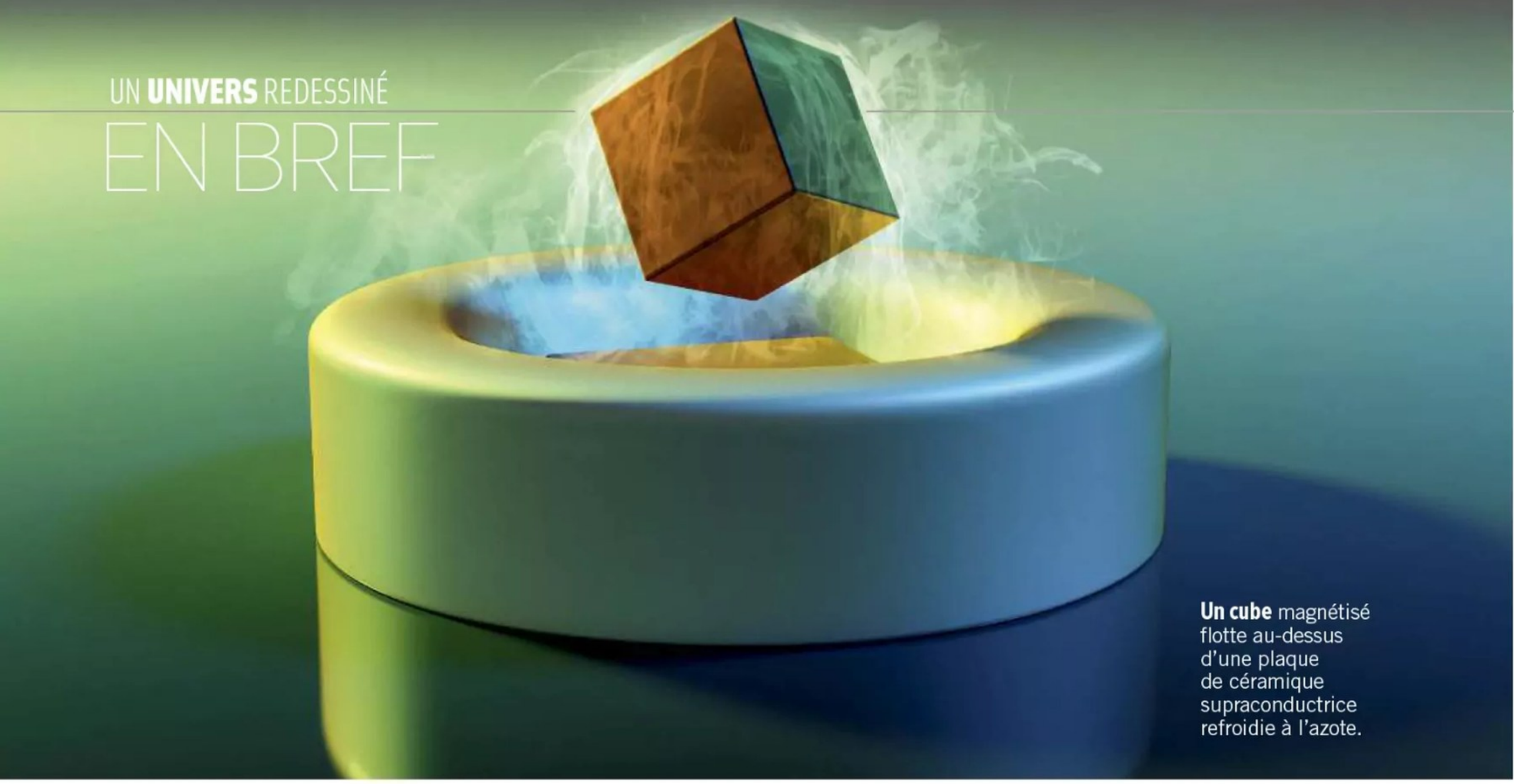
Une chimie qui simplifie la physique, la médecine et la biologie

Créer des molécules organiques complexes en un minimum d'étapes est une gageure pour le chimiste. Mais pas avec la « chimie click », dont l'approche vise à assembler n'importe quels blocs moléculaires grâce à un ensemble limité de réactions *« qui doivent avoir lieu dans des conditions douces – pas de haute température ni de pression – et donner des rendements élevés sans former de produit indésiré »*, explique Frédéric Taran, du Service de chimie bioorganique et de marquage de l'Institut Frédéric-Joliot. Cette technique a été mise au point indépendamment en 2002 par l'Américain Barry Sharpless et le Danois Morten Meldal, qui décrocheront le prix Nobel 2022. Leur idée: pour unir deux blocs moléculaires, on les équipe à l'une de leurs extrémités d'une petite unité organique ayant une forte affinité pour celle accrochée à l'autre. Il s'agira d'un azoture, soit trois atomes d'azote liés entre eux, et d'un alcyne, soit deux atomes de carbone associés par une triple liaison. Avec du cuivre en guise de catalyseur, l'azoture et l'alcyne réagiront rapidement pour former un anneau très stable unissant les deux chaînons atomiques. *« Simple et efficace, la chimie click, voire multi-click, a été adoptée par tous les chimistes organiciens, qui l'ont déclinée pour fabriquer des médicaments, des matériaux, etc.,* s'enthousiasme Frédéric Taran. *Mais c'est dans l'imagerie cellulaire et les thérapies ciblées que ses applications sont remarquables. »* Co-lauréate du Nobel, l'Américaine Carolyn Bertozzi a ainsi transposé ce concept en biologie pour améliorer la chimie dite « bioorthogonale » qui permet, au sein d'une cellule, de réaliser des réactions artificielles ne perturbant pas ses processus habituels. Pour se passer du cuivre, non biocompatible, elle a eu recours à un type d'alcyne dit cyclique, coincé dans un anneau de carbone, ce qui en augmente la réactivité. Adaptant la chimie click au vivant, elle est ainsi parvenue à observer des glucides complexes, ou polysaccharides, à la surface de membranes cellulaires, en fixant sur eux des molécules fluorescentes. *« Il est ainsi possible de voir si un anti-cancéreux atteint sa cible en lui injectant un marqueur radioactif ou fluorescent, conçu pour se clipser dessus »,* s'enthousiasme Frédéric Taran.

CAROLINE DEPECKER

«SIMPLE ET EFFICACE, LA CHIMIE CLICK A ÉTÉ ADOPTÉE PAR TOUS LES CHIMISTES ORGANICIENS »

Frédéric Taran, Service de chimie bioorganique et de marquage de l'Institut Frédéric-Joliot



Un cube magnétisé flotte au-dessus d'une plaque de céramique supraconductrice refroidie à l'azote.

MARK GARLICK/SPL/SUCRÉ SALÉ

MATERIAUX

La supraconductivité échauffe les esprits

Un matériau capable, à température ambiante, de conduire du courant sans lui opposer de résistance ? Ce serait la perspective de transporter et de stocker l'électricité sans aucune perte, ou de multiplier les trains à sustentation magnétique (Maglev) qui, portés par un puissant champ magnétique, ne touchent pas la voie. De quoi susciter le buzz à chaque annonce, même prématurée ou infondée, de la découverte d'un nouveau supraconducteur.

Ainsi, en juillet dernier, des scientifiques sud-coréens ont-ils présenté le LK-99, un matériau composé de cuivre, d'oxygène, de phosphore et de plomb. À leurs dires, il n'opposerait pas de résistance électrique jusqu'à 400 kelvin (127 °C). Un vrai miracle, puisque le record en la matière, vieux de trente ans, est de seulement 133 K (environ -140 °C) à la pression ambiante – il s'agit d'un cuprate associant du cuivre, de l'oxygène et d'autres éléments.

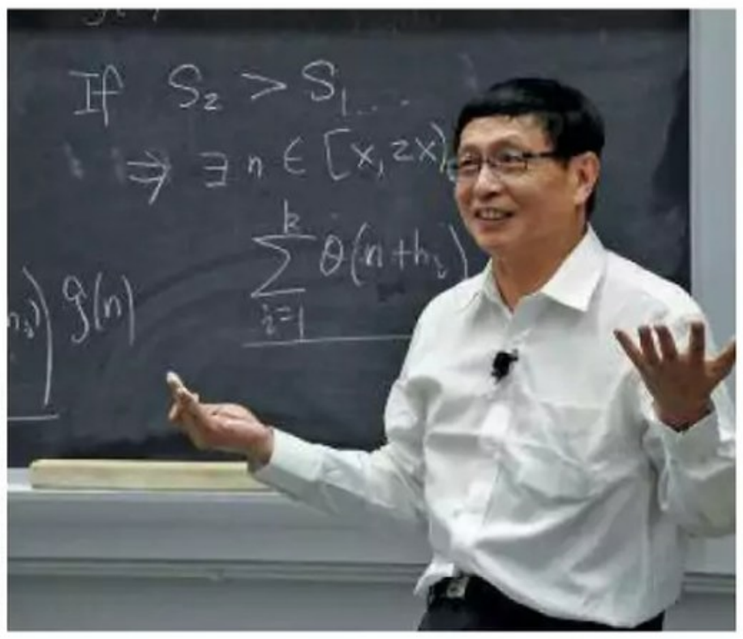
Surpris des performances présumées du LK-99, des physiciens ont immédiatement tenté de le « cuisiner ». Résultat : ce nouveau plat coréen est retombé comme un soufflé. Ce n'est qu'un isolant ne possédant aucune aptitude à la supraconductivité. Et pourtant, l'annonce a fait le tour du monde !

« La supraconductivité a un côté un peu magique, et l'intérêt qu'il suscite se renforce avec le réchauffement climatique et le renchérissement de l'électricité », explique Marc-Henri Julien, du Laboratoire national des champs magnétiques intenses, à Grenoble. Aujourd'hui, les supraconducteurs les plus courants sont des alliages métalliques associant du titane à du niobium ou à de l'étain, refroidis à l'hélium liquide autour de -270 °C. On peut en faire des câbles, par exemple pour construire de puissants électro-aimants pour l'imagerie médicale (IRM), la physique des particules ou les Maglev. C'est aussi la technologie retenue pour les aimants de confinement magnétique *(lire p. 39)* du futur réacteur expérimental sur la fusion (Iter), en construction en France, qui pourront créer un champ de 10 tesla. *« Aux États-Unis,* reprend Marc-Henri Julien, *la start-up de fusion CFS et le Massachusetts Institute of Technology (MIT) ont produit un champ deux fois plus intense. Cela permet de diviser par seize le volume de confinement ! »* C'est dire les enjeux que portent ces matériaux et la compréhension de leur fonctionnement…

Pour le chercheur, il ne fait guère de doute qu'on disposera un jour de matériaux supraconducteurs utilisables à la température ambiante. *« En revanche, personne n'a idée de l'échelle de temps. Il faut continuer à chercher, mais sans compter dessus pour résoudre nos problèmes urgents de transition énergétique ! »* **DENIS DELBECQ**

« IL FAUT CONTINUER À CHERCHER, MAIS SANS COMPTER DESSUS POUR RÉSOUDRE NOS PROBLÈMES URGENTS DE TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ! »

Marc-Henri Julien, Laboratoire national des champs magnétiques intenses



GEORGE CSICSERY/ZALA FILMS

Yitang Zhang, mathématicien chinois, a fait progresser l'étude des nombres premiers.

MATHEMATIQUES

LES NOMBRES PREMIERS SE PERDENT EN CONJECTURE

Depuis l'Antiquité, les nombres premiers – des entiers qu'on ne peut pas décomposer, à l'instar de 3 ou 5 – fascinent. En informatique, ils sont la clé de systèmes cryptographiques sûrs. En mathématiques, ils posent des énigmes fascinantes. En particulier, on ignore si leur répartition dans l'ensemble des nombres entiers suit des règles. Parmi la multitude de problèmes encore ouverts, la conjecture des nombres premiers jumeaux clame qu'il existe une infinité de nombres premiers dont la différence est égale à 2 (par exemple 11 et 13, 29 et 31 ou encore 227 et 229). Très simple à énoncer, elle résiste pourtant depuis des siècles à toute démonstration. Des avancées spectaculaires ont cependant eu lieu ces dernières années. La première faille dans cette forteresse est due au mathématicien chinois Yitang Zhang, qui démontre en 2013 par une méthode inédite qu'il existe une infinité de paires de nombres premiers dont l'écart est inférieur à 70 millions. 70 millions, ce n'est pas 2... Mais c'est la première fois que l'on prouve qu'une infinité de paires de nombres premiers ont un écart fini. Enthousiastes, les mathématiciens se mettent alors au travail et lancent un projet collaboratif. L'Australien Terence Tao, star de la discipline, et James Maynard, jeune prodige britannique, ramènent cet écart à 246. Les outils mis en œuvre sont très avancés, de sorte que même pour des énoncés aussi simples, un mathématicien amateur ne pourra sans doute pas apporter de contribution significative. Et l'intelligence artificielle n'est pas d'une grande aide. Le chemin paraît encore long jusqu'à 2... PHILIPPE PAJOT

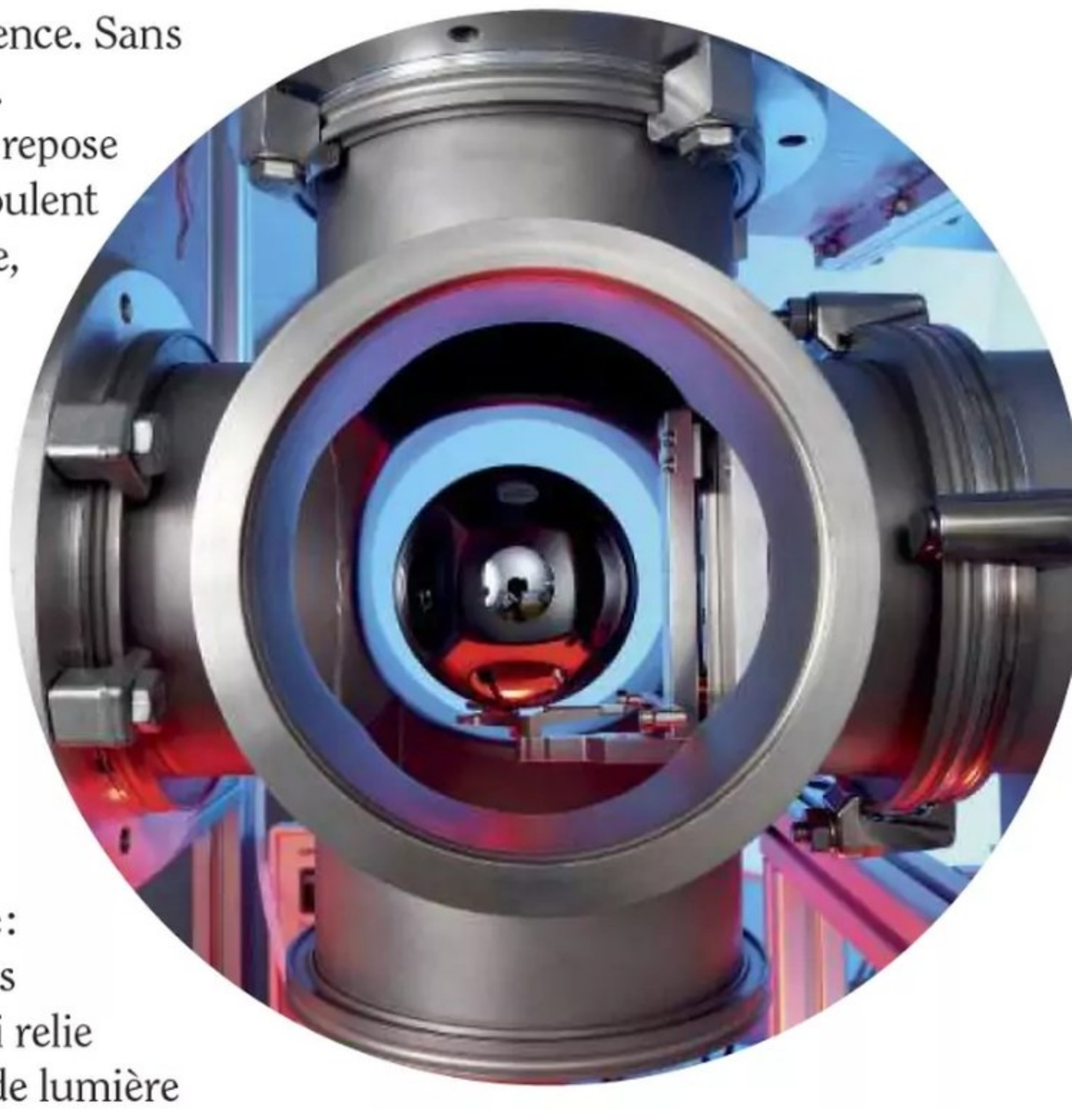
METROLOGIE

Les constantes de la physique imposent leur loi aux unités de mesure

Le 20 mai 2019, après cent trente ans de bons et loyaux services, le Grand K est devenu une pièce de musée. Ce cylindre de platine et d'iridium, enfermé dans une chambre forte du Bureau international des poids et mesures, à Sèvres (Hauts-de-Seine), était l'étalon du kilogramme depuis 1889. De temps à autre, on le sortait pour le nettoyer avec une peau de chamois, avant de le comparer à des répliques détenues dans d'autres pays. Lesquelles voyageaient vers Sèvres dans une valise diplomatique pour éviter qu'un douanier suspicieux ne les souille. Mais au fil du temps, le Grand K avait maigri. À moins que ce ne soit sa centaine de répliques qui aient grossi. On ne connaissait donc sa valeur qu'à 50 microgrammes près. Une incertitude – un vingt-millième – insupportable pour la science. Sans compter le risque de vol...

Le système international repose sur sept unités, dont découlent toutes les autres: le mètre, la seconde, la candela (intensité lumineuse), la mole (nombre d'atomes, d'ions ou de molécules), le kilogramme, le kelvin (température) et l'ampère (intensité du courant électrique). Jusqu'alors, seules les quatre premières reposaient sur des constantes de la physique: la vitesse de la lumière, les constantes de Planck (qui relie l'énergie d'une particule de lumière à sa couleur) et de Boltzmann (qui associe l'énergie interne d'un système à sa température), la charge élémentaire de l'électron et N, le nombre d'Avogadro *. La Conférence générale des poids et mesures a donc proposé en 2018 de faire rentrer dans le rang le kilogramme, le kelvin et l'ampère, tout en révisant les définitions de la mole et du nombre d'Avogadro. Le kilogramme se déduit donc désormais de la constante de Planck. Avec sa nouvelle définition, l'incertitude sur sa valeur est d'un cent-millionième. L'ampère, lui, repose sur la charge électrique élémentaire de l'électron. Le kelvin est désormais relié aux constantes de Planck et Boltzmann. Enfin, la mole est maintenant la quantité de matière d'un système contenant exactement N atomes. Autant de règles qui devraient résister à l'épreuve du temps. DENIS DELBECQ

* $6{,}02214076 \times 10^{23}\ \text{mol}^{-1}$.



NATIONAL PHYSICAL LABORATORY/SPL/SUCRÉ SALÉ

Les unités ont été redéfinies à partir de constantes, par définition immuables. Cette sphère de silicium pur relie la mole et le kilogramme à celle d'Avogadro.

PAGES RÉALISÉES PAR JACQUES-OLIVIER BARUCH

VERS L'INCONNU ET AU-DELÀ

Ces dernières années, télescopes, sondes ou rovers ont permis des avancées spectaculaires dans la connaissance du Cosmos. Et ce n'est qu'un début !

ONDES GRAVITATIONNELLES

À L'ÉCOUTE DES GALAXIES

Repérées ! En 2015, les instruments Ligo (États-Unis) et Virgo (Italie) ont débusqué pour la première fois des ondes gravitationnelles – ces oscillations de la courbure de l'espace-temps issues d'explosions d'étoiles, de fusions de trous noirs ou encore de collisions d'étoiles à neutrons. Mais ces détecteurs ne sont sensibles qu'à la fusion d'astres de quelques masses solaires. Comment repérer les ondes gravitationnelles émises, à très basse fréquence (de 1 à 100 nano-Hz), par la fusion de trous noirs de plusieurs milliers ou milliards de masses solaires ? Ce serait possible avec un « détecteur » de la taille… de la Galaxie, formé par les pulsars, ces étoiles à neutrons produisant des signaux à intervalles très réguliers. Les radiotélescopes du monde entier sont à l'écoute de leur fréquence afin d'y dénicher d'infimes variations qui signeraient le passage d'une onde gravitationnelle. En attendant, dans quelques millions d'années, la fusion des trous noirs nichés au centre de chacun des partenaires d'un couple de galaxies, les Antennes, qui se courtisent depuis longtemps…

NASA/ESA/HUBBLE

Les deux galaxies des Antennes, en collision depuis des millions d'années, observées par le télescope spatial Hubble.

NASA/JPL-CALTECH/ASU/MSSS

La colline de Santa Cruz, située dans le cratère martien Jezero, photographiée en 2021 par le rover Perseverance.

MARS

PAS DE VIE… MAIS DE L'ESPOIR

Sur la planète rouge, début 2021, le rover américain Perseverance et son petit hélicoptère Ingenuity ont rejoint Curiosity, qui a parcouru à ce jour 31 kilomètres depuis août 2012. S'est aussi posé, dans la même période, le rover chinois Zhurong. Tous trois sillonnent les solitudes asséchées – cratère Gale pour Curiosity, cratère Jezero pour Perseverance et plaine d'Utopia Planitia pour Zhurong – afin de rechercher des traces de vie passée et de comprendre la géologie de notre planète sœur. Devrait les rejoindre le rover européen Rosalind-Franklin, dont le lancement a été reporté à 2028 du fait de la guerre en Ukraine.

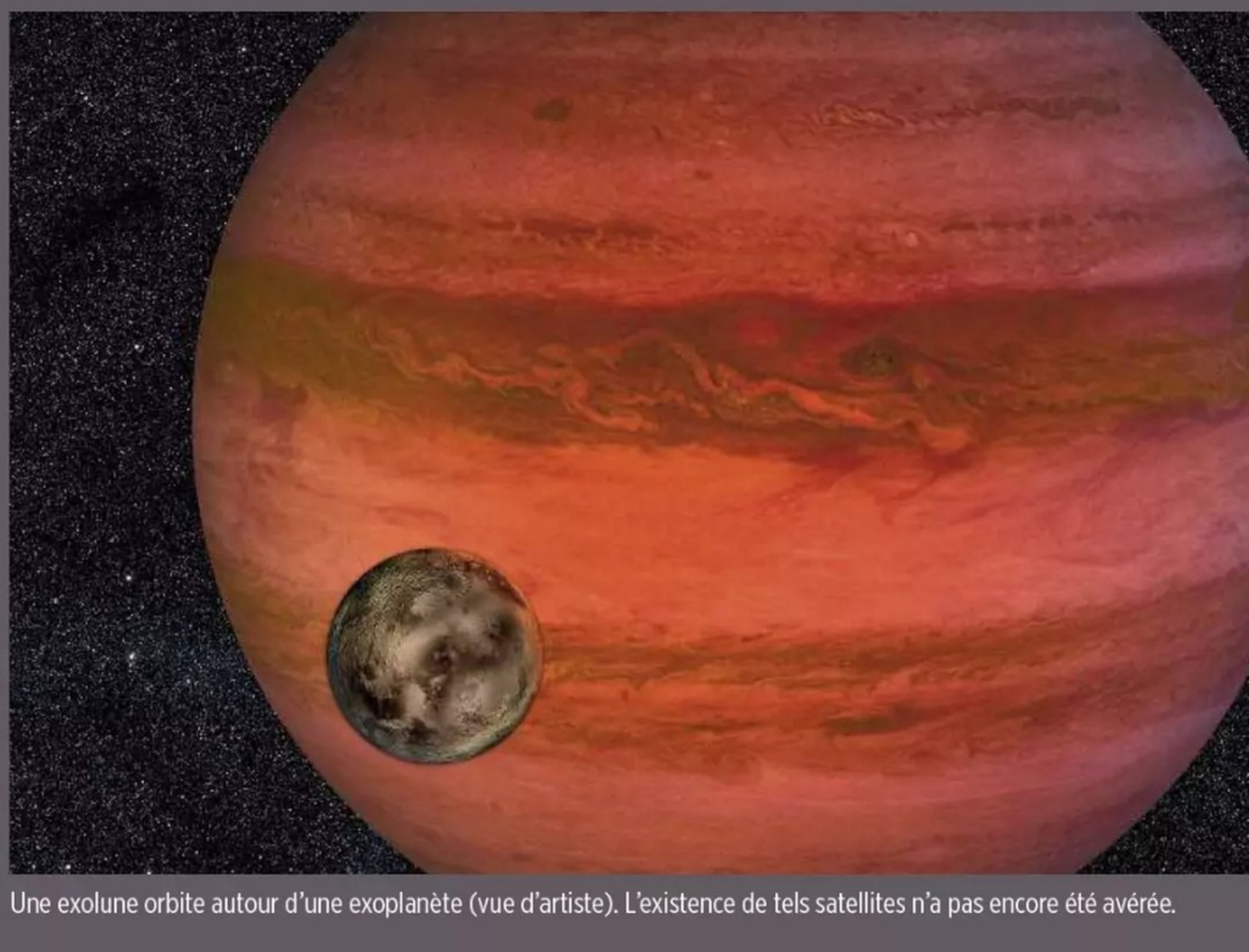
NASA/JOHNS HOPKINS APL

La sonde Dart et sa cible, l'astéroïde Dimorphos.

ASTÉROÏDES

CRASH-TEST SPATIAL

Comment faire dévier un corps céleste qui risquerait d'entrer en collision avec la Terre? En septembre 2022, la Nasa a procédé à une expérience grandeur nature en envoyant s'écraser la sonde américaine Dart sur Dimorphos, satellite de l'astéroïde Didymos, à 11 millions de kilomètres de notre planète. Test réussi, s'est félicitée la Nasa, qui procède maintenant à des analyses afin de déterminer la composition de ce caillou poreux de 160 mètres de diamètre. Les chercheurs seront aidés par la mission européenne Hera qui s'élancera vers Didymos en octobre 2024, et par les échantillons d'un autre astéroïde, Bennu, rapportés en septembre 2023 par la sonde américaine Osiris-Rex.



NASA/JPL/CALTECH NASA/SPL/SUCRE SALÉ

Une exolune orbite autour d'une exoplanète (vue d'artiste). L'existence de tels satellites n'a pas encore été avérée.

EXOPLANÈTES

ATMOSPHÈRES EN VUE!

Avec sa vision centrée sur l'infrarouge, le télescope spatial James-Webb (JWST) est parfaitement adapté à l'étude de l'atmosphère des exoplanètes. En témoigne la détection de méthane et de dioxyde de carbone dans l'atmosphère de K2-18b, une superterre qui gravite autour d'une naine rouge à 124 années-lumière de nous et qui pourrait être une planète-océan. En atteste aussi l'observation, en juillet 2022, quelques mois après son lancement, de Wasp-39b, une sorte de Saturne très proche de son étoile, autour de laquelle le télescope spatial a découvert pour la première fois du dioxyde de soufre. Et que dire des sept planètes rocheuses du système Trappist-1, scrutées elles aussi par le James-Webb? La seconde d'entre elles, Trappist-1c, pourrait être enveloppée d'une atmosphère ténue contenant du dioxyde de carbone.

Une **PLANÈTE** à protéger

Les chercheurs sont désormais en mesure de déterminer à quel point canicules, sécheresses ou épidémies sont liées au changement climatique induit par l'humain. Et ils préviennent : pour atténuer les conséquences de ce dérèglement, le maître mot des décennies à venir devra être « sobriété » ! Une sobriété qui fera la part belle à la douceur de vivre...

COURTESY OF TAMARA DEAN AND MICHAEL REID SYDNEY + BERLIN

Elephant Ear in Autumn (Oreilles d'éléphant, *Alocasia odora*, en automne), œuvre de la photographe Tamara Dean.

> ENVIRONNEMENT

La sobriété, une idée en pleine croissance

C'est l'Académie des technologies qui le dit : la technique seule ne suffira pas à préserver la Terre. Produire mieux, consommer moins, guider la recherche vers des applications durables… les pistes à emprunter sont plurielles. Avec, à la clé, une meilleure qualité de vie.

En 2010, l'agro-écologue Pierre Rabhi suscitait les moqueries à peine dissimulées de la grande majorité de la population française avec le titre de son livre *La Sobriété heureuse*. Aujourd'hui, l'expression est soutenue par le gouvernement d'Élisabeth Borne – soucieux de se démarquer d'une quelconque austérité –, martelée aux heures de grande écoute des médias, adoptée – du moins en apparence – par de grands groupes industriels. Comme si tous les acteurs de la société découvraient soudain que le bonheur n'est pas lié aux capacités d'achat. Ce ralliement préfigure-t-il la sortie de la société de consommation ? Si tel était le cas, ce serait plus par contrainte que par conviction.

Mais de quoi la sobriété est-elle le nom ? Lors de la remise de son sixième rapport, début 2023, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec) en a donné pour la première fois sa propre définition : *« Un ensemble de mesures et de pratiques du quotidien qui permettent d'éviter la demande d'énergie, de matériaux, de terres et d'eau, tout en garantissant le bien-être de tous les êtres humains dans le respect des limites planétaires »*. Cette prise de position scientifique est passée inaperçue. *« La guerre en Ukraine a tout changé »*, note Anne Bringault, porte-parole du Réseau Action Climat (RAC), qui fédère les associations luttant contre le changement climatique. À l'automne 2022, l'arrêt des achats de gaz et de pétrole à la Russie, la faible disponibilité d'un parc nucléaire vieillissant et des centrales hydroélectriques affectées par un été très sec font craindre des coupures d'électricité et des pénuries de gaz. C'est le retour en force des messages d'économie qui font écho à la « chasse au gaspi » lancée dans les années 1970 pour atténuer les effets de la crise pétrolière.

Rapport de l'Académie des technologies,
« Matières à penser sur la sobriété », 2022,
sciav.fr/aca-techno

Rapport de l'OPESCT,
« Les implications en matière de recherche et d'innovation technologique de l'objectif de sobriété énergétique », 2023,
sciav.fr/opesct

Le site de Kate Raworth,
kateraworth.com

Il ne s'agit pas de revenir à la bougie ou de vivre comme les Amish

Cette fois-ci, le slogan c'est : « Chaque geste compte ». Mais à la différence d'il y a cinquante ans, où les habitudes de consommation n'ont été que temporairement modifiées, la sobriété se veut aujourd'hui « structurelle », au nom de la lutte contre le changement climatique. Pour la plus grande satisfaction d'ingénieurs comme ceux réunis au sein de l'association négaWatt, qui plaident inlassablement depuis les années 1980 pour une action concertée contre les pollutions, et placent la sobriété en tête des priorités, devant l'efficacité énergétique – l'amélioration technique des appareils – et le développement des énergies renouvelables. *« Nous sommes assis sur une montagne de gaspillage*, constate Samuel Martin, ingénieur, expert sobriété dans le bâtiment chez négaWatt. *Sans affec-*

NEGAWATT

« NOUS SOMMES ASSIS SUR UNE MONTAGNE DE GASPILLAGE. SANS AFFECTER NOTRE CONFORT, NOUS POURRIONS RÉDUIRE DE 30 % LA CONSOMMATION DES LOGEMENTS »

Samuel Martin, ingénieur, association négaWatt

EMILE LOREAUX/HANS LUCAS

ter notre confort, nous pourrions réduire la consommation énergétique moyenne des logements d'environ 30 % en isolant les bâtiments, et surtout en adoptant des comportements plus économes. »

L'hiver 2022-2023 s'est finalement passé sans encombre. La France a diminué sa consommation d'énergie de 8 % avec quelques gestes simples – parfois imposés, surtout pour les plus modestes, par la hausse des prix – comme la baisse de la température de chauffage dans les logements. Dès le printemps 2023, la production d'énergie nucléaire est repartie à la hausse, et le GNL algérien, qatari ou américain a remplacé le gaz russe boycotté… Mais cette fois, la mobilisation des consommateurs n'a pas reflué comme dans les années 1970, les messages des pouvoirs publics n'ont pas cessé. Mieux, ils se sont trouvés confortés par de nombreux travaux de réflexion.

Ainsi, l'Académie des technologies a publié au printemps 2023 la synthèse d'un séminaire qu'elle a consacré au sujet. Les conclusions de ce travail sont ponctuées d'une série de messages forts. Le premier : la sobriété est nécessaire à court terme *« car la technologie ne suffira pas à faire face à l'urgence climatique »*. Le second : *« La sobriété est nécessaire au progrès et le progrès est nécessaire à la sobriété »*. En clair, il ne s'agit pas de revenir à la bougie ou d'adopter le mode de vie des Amish, une communauté américaine qui refuse la modernité. Enfin, *« les experts doivent éclairer les choix pour favoriser un discernement technologique collectif »*. Autrement dit, les choix technologiques doivent reposer sur une analyse de leurs bénéfices, de leurs coûts, et *« de leurs risques pour la collectivité et pour la planète »*. Et l'Académie enfonce le clou : *« L'existence d'un marché viable ne saurait garantir qu'une innovation soit opportune. »*

C'est là que la sobriété vient percuter l'économie de marché. Une nouvelle règle serait donc appelée à s'imposer, celle de l'utilité réelle d'un objet et de sa compatibilité avec la capacité de la Terre à supporter la charge de sa fabrication et de son utilisation. La définition de l'Académie pourrait ainsi concerner ◆◆◆

◆◆◆ le téléphone portable, l'avion et même la voiture individuelle. L'économiste américaine Kate Raworth résume cette exigence en une image, celle du *donut,* ce beignet rond troué en son milieu. La limite interne du *donut* représente le minimum vital nécessaire à chaque être humain en matière d'accès à une alimentation saine, à une eau potable et à l'assainissement, aux services de santé, à l'éducation. Le bord externe représente le degré maximal de consommation de chaque individu dans le respect des limites planétaires que sont le trou dans la couche d'ozone, le changement climatique, la perte de biodiversité, les pollutions chimiques, la dégradation de l'eau douce. *« Le défi pour l'humanité du XXIe siècle est d'assurer que personne ne manque de ce qui est essentiel et vital (de la nourriture et l'habitat à la santé et à la liberté politique), tout en garantissant que nous n'exerçons pas, collectivement, une pression excessive sur les systèmes indispensables à la vie sur Terre et dont nous dépendons fondamentalement, comme un climat stable, des sols fertiles, une couche d'ozone protectrice »*, résume ainsi Kate Raworth. Le train de vie des plus riches est donc condamnable. Et de plus en plus dénoncé par les associations de protection de l'environnement, mais aussi dans les enceintes nationales et internationales par les hommes et femmes politiques favorables à une taxation plus forte des consommations,

ERIC TSCHAEN/REA

« ÉCOLOGIE PUNITIVE ? CE SONT LES GÉNÉRATIONS FUTURES QUI VONT ÊTRE PUNIES. ELLES SUBIRONT LES CONSÉQUENCES DE NOTRE MANQUE DE SOBRIÉTÉ »

Anne Bringault,
porte-parole
du Réseau Action Climat

comme l'illustre le débat actuel sur l'instauration d'une taxe climat sur les plus riches.

Les thermostats programmables, c'est bien… mais pas suffisant

En France, cette « théorie du *donut* » est citée par la commission de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et techniques (OPESCT) dans son rapport remis le 27 juin 2023 sur « Les implications en matière de recherche et d'innovation technologique de l'objectif de sobriété énergétique ». Députés et sénateurs l'écrivent ainsi noir sur blanc : la sobriété dépasse largement le cadre de la seule production d'énergie pour englober la totalité de l'activité humaine. *« En réalité, quand on parle d'énergie, on parle aussi de la fabrication des produits, de leur consommation lorsqu'on s'en sert, si bien que tous les aspects de l'économie sont concernés, tout comme les choix collectifs que nous faisons, par exemple entre la route et le train, ainsi que les réglementations qui doivent inciter à la sobriété »*, pose Olga Givernet, députée Renaissance, rapporteure de ces auditions.
Pour les parlementaires, l'apport des technologies, s'il n'est pas suffisant, est cependant essentiel. Ainsi, en juin dernier, un décret a imposé l'implantation de thermostats programmables dans l'ensemble des logements à partir de janvier 2027. *« Depuis 2010, nos appareils de régulation de chauffage sont pilo-*

Vers un monde sans pétrole

En 2050, seuls quelques véhicules de secours ou de police, de rares bateaux et avions fonctionneront encore aux énergies fossiles. En octobre 2023, 68 États, dont la France, se sont en effet engagés à atteindre le « zéro carbone net », c'est-à-dire à faire en sorte de réduire leurs émissions de gaz à effet de serre de façon à ce que les quelques millions de tonnes résiduelles soient absorbées par le puits de carbone que constituent les forêts et la végétation. Un vœu pieux ? *« Cette neutralité carbone ne peut pas être atteinte sans sobriété,* assène Mathieu Auzanneau, directeur exécutif du Shift Project, bureau d'études spécialisé dans la transition énergétique. *Le pétrole et le gaz ont en effet une densité énergétique et une disponibilité imbattables par rapport aux énergies renouvelables… Et ils sont bien plus simples à mettre en œuvre que le nucléaire. »* En d'autres termes, supprimer l'usage du pétrole implique qu'on ne pourra pas produire autant de biens, à quantité d'énergie égale. Les progrès dans les rendements des machines permettent certes d'économiser en énergie et en matière (les voitures d'aujourd'hui consomment bien moins que celles d'hier), mais ont des limites physiques infranchissables. Ainsi, les constructeurs ne savent pas faire des moteurs thermiques consommant 1,5 litre aux 100 kilomètres. Enfin, certains secteurs comme l'automobile (30 % des émissions mondiales de CO_2) ne peuvent perdurer qu'en réduisant leur activité. Selon le Shift Project, pour décarboner, ce secteur devra réduire de 300 kg (hors batteries) le poids de chaque voiture, limiter la taille des moteurs électriques à 50 kWh et, surtout, réduire de 40 % le nombre de véhicules en circulation, par l'amélioration des taux de remplissage et le report vers les transports en commun, la marche et le vélo.

EMILE LOREAUX / HANS LUCAS

tables à distance à partir des applications installées sur les téléphones portables, explique Anne-Sophie Perrissin-Fabert, déléguée générale d'Ignes, le syndicat qui regroupe les industriels proposant des solutions électriques et numériques dans le bâtiment. *Chacun peut ainsi diriger sa consommation, moduler le chauffage en fonction du juste besoin.* » Tous les Français sont-ils capables de maîtriser ces technologies du numérique ainsi que l'impose désormais la réglementation ? *« C'est aux industriels de proposer la bonne solution pour la bonne personne »*, rétorque Anne-Sophie Perrissin-Fabert.

Plaidant pour la notion du « juste assez » figurant la bordure extérieure du *donut,* Olga Givernet combat cependant « l'écologie punitive » par laquelle imposer des mesures reviendrait à brider l'activité de certains secteurs économiques et, surtout, pourrait compliquer la vie quotidienne d'actifs qui sont aussi des électeurs. La sobriété passe ainsi aujourd'hui par des messages incitatifs destinés au grand public et par des concertations par secteurs. Les industriels s'engagent à réduire leurs besoins en chaleur et en énergie, les gestionnaires des parcs de bureaux à baisser la température de chauffage, et même les clubs de sport à faire plus attention à leur consommation. La sobriété passe également par des choix de plus long terme, comme l'aménagement urbain pour réduire les distances entre le domicile et le travail, la réduction des besoins en énergie de l'agriculture et de la pêche, la priorité donnée aux transports en commun plutôt qu'à la voiture…

Manger sainement, respirer un air plus pur

Le rapport parlementaire plaide ainsi pour une politique de « l'effort partagé » qui consisterait également à mieux informer les Français des gains à attendre de la sobriété : meilleure santé dans des villes débarrassées de la pollution des voitures, effets positifs d'une alimentation moins carnée, économies réalisées par la conduite à 110 km/h sur l'autoroute, etc. Le hic, c'est que ces messages passent beaucoup moins bien que les vives protestations, relayées par nombre de politiciens, contre par exemple le contingentement des permis de construire de maisons neuves dans le cadre de l'objectif « Zéro artificialisation nette » ou les restrictions de circulation dans les zones à faibles émissions. Le Réseau Action Climat vient de publier sa vision de la France – et de la planète – en 2050. *« Un pays où l'on mange sainement, où l'on respire un air plus pur, où, surtout, on recommence à prendre le temps »*, résume Anne Bringault… que la notion « d'écologie punitive » énerve tout particulièrement. *« Celles qui vont être punies, ce sont les générations futures qui vont subir le réchauffement climatique provoqué par notre manque de sobriété. »* Exactement ce que disait Pierre Rabhi.

LOÏC CHAUVEAU

> CLIMAT

On ne pourra plus dire qu'on ne savait pas !

Canicules, sécheresses, inondations… Les scientifiques disposent aujourd'hui d'outils permettant de prouver le lien entre ces événements extrêmes et le réchauffement global.

Dire qu'il y a dix ans à peine, le changement climatique n'était redouté que pour ses effets à moyen terme. *« Pas avant trente ans! »*, affirmaient les plus pessimistes des climatologues. C'est aussi ce que concluait en 2014 le cinquième rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat – le Giec, qui incitait à l'action pour retarder la survenue des conséquences délétères de l'accumulation des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère. La règle était alors de ne pas mélanger météo et climat, les événements ponctuels avec la temporalité longue des conditions stables et « normales » de température et de précipitations. Cette distinction s'est effondrée. Le climat impacte déjà avec violence la météo. L'action devient urgence. On pouvait jusqu'à présent parvenir à cette conclusion de manière empirique, en observant la recrudescence de tempêtes inédites ou de sécheresses à répétition… C'est aujourd'hui « prouvé » par la science, qui vient d'ouvrir un nouveau champ de recherche : l'attribution. Autrement dit, la recherche de la probabilité du lien entre une catastrophe naturelle et le changement climatique. Et les jeunes climatologues en voient leur carrière réorientée.

Cette bifurcation, Davide Faranda l'a vécue en 2012. Jusqu'ici, son champ d'études consistait à considérer les événements extrêmes avec un regard de géophysicien et une approche de mathématicien. Sa thèse, entreprise à l'université de Reading aux États-Unis et achevée à l'université de Hambourg en Allemagne, portait sur les valeurs extrêmes des flux géophysiques. *« Il s'agit de déterminer si un événement est un fait rare qui sort des probabilités ou s'il s'inscrit dans un système, par exemple le fonctionnement de l'atmosphère, où des événements grands ou petits reviennent plus ou moins périodiquement,* explique le chercheur. *Rare ne signifie cependant pas extrême. On ne parle pas ici de la violence inédite d'un évènement, mais du fait qu'il est peu fréquent.* » Ainsi, un cyclone qui n'a rien d'exceptionnel d'un point de vue physique peut pourtant occasionner des dégâts immenses parce qu'il traverse des régions mal préparées à affronter vents violents et pluies diluviennes.

En cette année 2012, un projet européen sur le calcul intensif conduit Davide sur le campus de Polytechnique à Saclay. Son profil de mathématicien et de physicien intéresse

YUKI IWAMURA FOR THE WASHINGTON POST/GETTY IMAGES

Déluge. Le 29 septembre dernier, des pluies torrentielles se sont abattues sur New York, causant d'importantes inondations et paralysant la ville.

D. FARANDA

« NOUS CHERCHONS DANS LE PASSÉ DES ÉVÉNEMENTS SIMILAIRES À CEUX QUE NOUS ÉTUDIONS, AFIN DE TRAQUER LES DIFFÉRENCES ATTRIBUABLES À LA HAUSSE GLOBALE DES TEMPÉRATURES »

Davide Faranda, directeur de recherche CNRS, Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement

vivement la spécialiste des turbulences Bérengère Dubrulle (prix Irène Joliot-Curie 2022), qui l'implique dans son équipe. Ce post-doctorat sur le fonctionnement théorique des turbulences l'amène à fréquenter les chercheurs du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement voisin. Le LSCE s'intéresse aux travaux de Bérengère Dubrulle, car l'atmosphère est composée de tourbillons atmosphériques et de spirales aériennes qui en font un univers chaotique que l'on cherche à traduire en équations. Davide entre ainsi en climatologie.

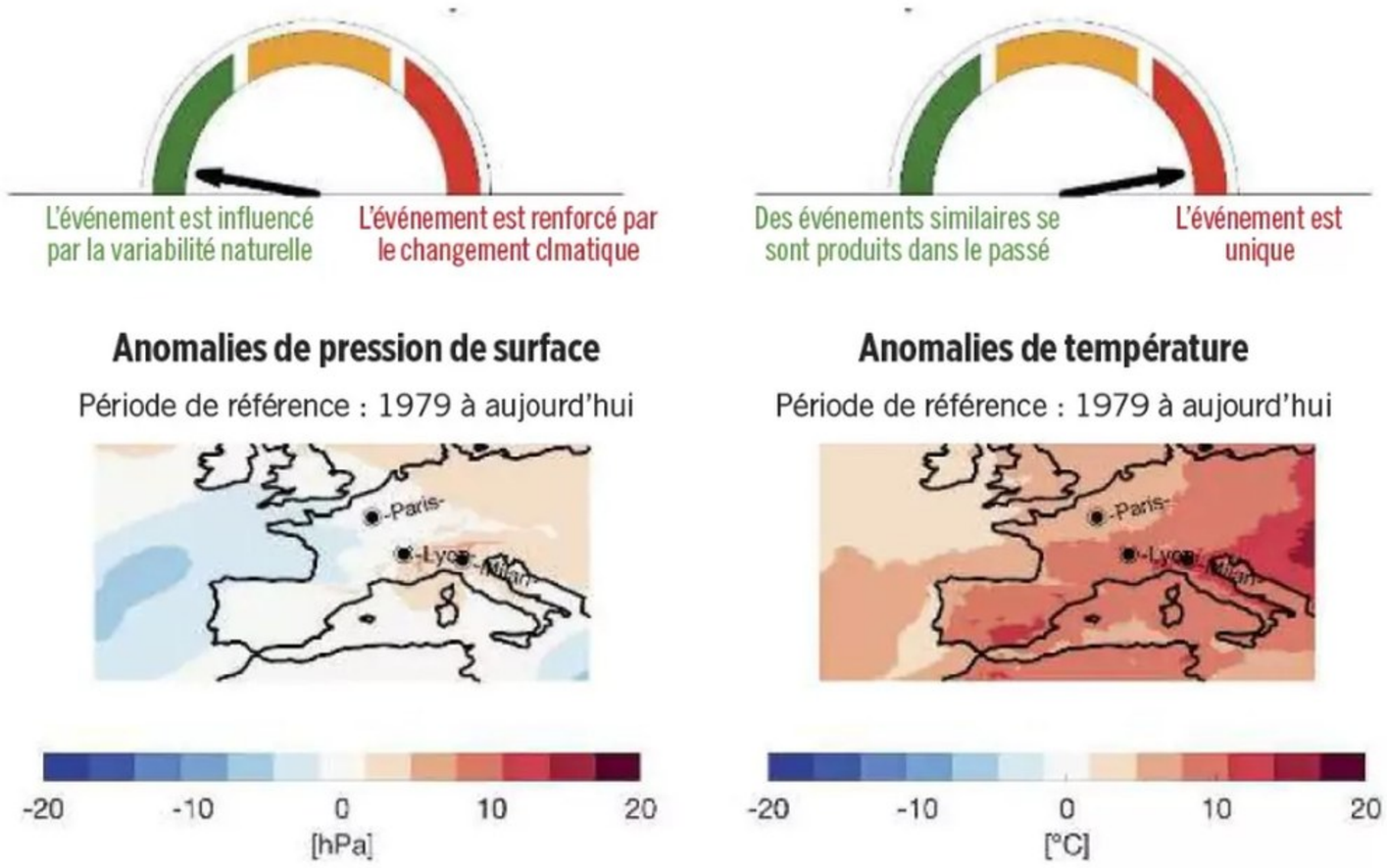
C'est une période charnière. À l'été 2015, une canicule féroce affecte les travaux de climatologues réunis à Toulouse. Dans les bureaux de Météo France, la question pointe: et si ces températures jamais vues avaient un lien avec le changement climatique? Et si une augmentation de 1 °C – « seulement » – suffisait à modifier notre environnement? Car si les évènements météo surviennent naturellement, par le fruit de la rencontre hasardeuse de deux masses d'air par exemple, leur fréquence et leur intensité peuvent être modifiées par la hausse globale des températures. Les chercheurs, dont Robert Vautard, actuellement vice-président du Giec, se mettent au travail. Une démarche est définie. D'abord, caractériser l'événement selon sa durée et son intensité. Ensuite, à partir des observations collectées sur plus d'un siècle, établir si ce type d'événement est plus ou moins fréquent – et intense – ces dernières décennies. Enfin, montrer que les caractéristiques de l'épisode étudié sont dues à l'augmentation des GES, et non à d'autres causes. Comment? *« En comparant deux jeux de simulations, l'une basée sur l'atmosphère actuelle et sa teneur en GES, à 420 ppm (parties par million) et l'autre reprenant les valeurs de l'ère pré-industrielle, à 280 ppm, ce qui permet d'estimer la différence de probabilité des événements »,* explique Robert Vautard.

C'est ainsi qu'est créé le World Weather Attribution (WWA), un réseau scientifique international capable, en quelques semaines, ◆◆◆

Le site du World Weather Attribution :
https://www.worldweather attribution.org/

Le site de ClimaMeter :
https://www.climameter.org/about-climameter

Le site du Extreme Events Attribution :
https://sciav.fr/extremevents



HTTPS://WWW.CLIMAMETER.ORG/20230908-13-OCTOBER-EUROPEAN-HEATWAVE

Publiés par le site Climameter, ces graphiques synthétisent les mesures des climatologues lors de la vague de chaleur de septembre 2023. Ils montrent (en haut) que si l'événement est unique, les variations météorologiques naturelles l'expliquent en majeure partie.

◆◆◆ de donner la probabilité – forte, moyenne, faible – qu'un événement est exacerbé par le changement climatique. Prenons pour exemple les trois jours de canicule de la fin juin 2019, qu'ont disséqués les chercheurs du LSCE et de Météo France. Ils ont confronté ces valeurs aux statistiques météo disponibles depuis le début du XX[e] siècle afin de retrouver des vagues de chaleur similaires. Conclusion : sans les effets du réchauffement climatique, les températures maximales de l'épisode de 2019 auraient été inférieures de 4 °C. Les modèles annoncent par ailleurs que la probabilité que surviennent de tels événements est désormais quatre fois plus grande qu'au début du siècle. Confirmation de ces prévisions a été donnée par la canicule tout aussi forte qui a accablé l'Europe en juin 2022, et qui est notamment considérée par le WWA, pour le Royaume-Uni, comme un événement rare, soit en dehors des variations naturelles de la météo.

La méthode actuelle est satisfaisante, mais lente. Le WWA ne donne son verdict que deux à trois mois après l'événement, ce qui dilue son message auprès du grand public. Davide Faranda préfère l'image « de la vraie vie » et propose donc une alternative. Il devient ainsi en 2020 le coordinateur, au sein du LSCE, d'une unité baptisée « Extrêmes : statistiques, impacts et régionalisation » (ESTIMR). « *Nous cherchons dans le passé des évènements similaires à celui que nous étudions, et nous comparons les mécanismes atmosphériques qui ont abouti à ces phénomènes afin de traquer les différences attribuables à la hausse globale des températures* », explique le chercheur. Le laboratoire a ainsi développé des approches statistiques basées sur des données physiques comme la pression atmosphérique, les vents ou la température, tirées de l'observation des événements extrêmes telle la vague de froid tardive d'avril 2021 en France, ou les tornades qui ont frappé la vallée du Pô en Italie en septembre de la même année. À conditions égales, la différence entre les températures ou les précipitations enregistrées aujourd'hui et il y a des décennies signe une modification qui ne peut être attribuée qu'au réchauffement climatique – la seule autre explication possible étant une variation de la distance entre la Terre et son soleil, impossible sur une durée si courte.

THIBAUT DURAND / ABC/ANDIA.FR

Les responsables devront rendre des comptes

Depuis 2020, le site du Extreme Events Attribution créé par ESTIMR fournit ainsi, en quelques jours seulement, ses conclusions sur les liens entre un phénomène météo et le changement climatique. Sa rapidité permet d'examiner des événements exceptionnels mais moins dramatiques, comme l'incroyable été indien d'octobre 2023 qu'ont traversé la France et une grande partie de l'Europe de l'Ouest. « *Cette vague de chaleur est de 1,5 à 4 °C plus chaude que celles qui ont été mesurées par le passé* », constate Davide Faranda. Parallèlement, le site ClimaMeter (en anglais) a été ouvert pour traduire ces résultats scientifiques dans un langage aisément compréhensible.

Cet effort de vulgarisation destiné au public le plus large s'inscrit dans une démarche de responsabilité sociale. Car les effets du changement climatique affectent désormais les infrastructures et les biens. Il y a des victimes. C'est tout l'enjeu du débat en cours à l'ONU sur les « pertes et dommages » subis par des populations qui, historiquement, ne sont pour rien dans les émissions de gaz à effet de serre. Les juristes vont donc pouvoir produire devant les tribunaux les preuves scientifiques démontrant qu'il y a bien des responsables derrière les catastrophes, et que ceux-ci doivent rendre des comptes.

LOÏC CHAUVEAU

L'HUMAIN, VICTIME ET RESPONSABLE DES ZOONOSES

Le covid-19 en est la meilleure illustration : les infections transmises par les animaux ont explosé ces dernières années. En cause, l'élevage industriel, mais aussi la déforestation, qui favorisent les contacts entre les espèces.

Au printemps 2020, avec l'irruption du covid-19, le terme de zoonose, évocateur de chauves-souris et de pangolins, a envahi nos conversations et phagocyté nos imaginaires. Du grec *zoon*, « *animal* », et *nosos*, « *maladie* », il désigne les pathologies dont l'agent infectieux – bactérie, virus, parasite, champignon ou prion –, issu d'une espèce animale, est transmis à l'humain – par contact, voie alimentaire ou vecteur (moustique, tique…). De la grippe à la peste ou à la rage, les zoonoses jalonnent l'histoire de nos relations avec les animaux depuis des millénaires. Elles représentent 60 % des maladies infectieuses humaines. « *La rougeole, par exemple, nous a été transmise par la vache. Elle est aussi vieille que la domestication* », indique Coralie Martin, professeure de parasitologie au Muséum national d'histoire naturelle. Principales espèces réservoirs de pathogènes : les mammifères (chauves-souris, rongeurs, primates), certains oiseaux, le bétail (porcs, chameaux, vaches) et la volaille.

Ebola. Au Gabon, des biologistes effectuent des prélèvements et des autopsies sur des animaux susceptibles d'héberger le virus. Munis de protections renforcées, ils officient dans des laboratoires de brousse.

CHRISTOPHE LEPETIT

Le surgissement en Chine en 2019 d'un virus inconnu, baptisé SARS-CoV-2 et dont l'espèce réservoir serait la chauve-souris, a confirmé les pires craintes de la communauté scientifique internationale, qui s'alarmait de l'émergence à un rythme de plus en plus soutenu de nouvelles épidémies zoonotiques. « *Le nombre de maladies infectieuses émergentes a été multiplié par quatre depuis les années 1980, et 75 % d'entre elles sont des zoonoses*, précise Benjamin Roche, biologiste, directeur de ◆◆◆

◆◆◆ recherches à l'Institut de recherche pour le développement (IRD). *Et avec la mobilité qui caractérise nos sociétés, il était à craindre qu'une zoonose se transforme rapidement en problème mondial.* » Il a en effet suffi de quelques cas de pneumonie atypique en Chine pour que la quasi-totalité de la planète soit contrainte de se confiner. Avec un bilan terrible: officiellement 6,95 millions de morts du covid-19 dans le monde en quatre ans.

Dans les années 1980, le tournant du VIH

Dans les années 1970, la lutte contre les maladies infectieuses semblait pourtant gagnée. « *On baignait dans une espèce d'euphorie,* rappelle Serge Morand, écologue de la santé au CNRS. *Grâce au combat des hygiénistes contre les conditions de vie insalubres puis à la chimie, avec l'invention des antibiotiques, vaccins et pesticides, on pensait en avoir fini avec le fardeau infectieux.* » Mais l'émergence dans les années 1980 du VIH — le virus du sida, issu d'une espèce de chimpanzés du Cameroun – a fracassé cet optimisme. La menace s'est confirmée avec la rafale d'épidémies zoonotiques qui a suivi: syndromes respiratoires aigus (Sras), coronavirus du syndrome respiratoire du Moyen-Orient (Mers), H5N1 (grippe aviaire), ébola, zika, chikungunya, peste pulmonaire…

La pandémie de covid-19 nous a fait prendre conscience du lien entre zoonoses et déclin de la biodiversité, entre épidémies et anthropisation des écosystèmes naturels. Dans un rapport publié en octobre 2020, la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES) dressait un constat global: « *Les mêmes activités humaines sont à l'origine du changement climatique, de la perte de biodiversité et, de par leur impact sur notre environnement, du risque de pandémies.* »

Exemples de ces pratiques néfastes: la déforestation et l'industrialisation de l'élevage, deux facteurs majeurs de perte de biodiversité et de contacts accrus entre faune sauvage, hommes et bétail. « *Dans un écosystème en bonne santé, la biodiversité assure des services de régulation, grâce aux interactions entre espèces comme la prédation ou la compétition, mais aussi aux effets de dilution des agents pathogènes,* explique Benjamin Roche. *Car plus un écosystème est riche, moins un pathogène pourra aisément s'y installer. En revanche, dans un milieu pauvre en biodiversité, le pathogène s'adapte aux quelques espèces présentes et sa prévalence s'élève. Il a donc une probabilité plus grande d'infecter les hommes.* » Or la déforestation s'amplifie – cultures, élevage, urbanisation, orpaillage –, ce qui rapproche humains et animaux domestiques de la faune sauvage.

Surpopulation, homogénéité génétique, promiscuité entre animaux et humains… L'impact des poulaillers industriels dans la transmission d'agents pathogènes est aujourd'hui avéré.

L'industrialisation de l'élevage contribue elle aussi grandement à l'émergence des zoonoses: les animaux domestiques deviennent des hôtes intermédiaires pour les agents pathogènes de la faune sauvage et les transmettent au personnel des élevages. « *Le nombre des animaux de rente a augmenté de manière vertigineuse!* alerte Serge Morand. *On compte aujourd'hui dans le monde 1,6 milliard de bovins contre moins d'un milliard en 1960. La biomasse totale du bétail est plus élevée que celle des êtres humains! Du bétail qu'il faut nourrir… ce qui entraîne une transformation de la planète, de plus en plus cultivée.* »

L'histoire du virus Nipah illustre bien ces liaisons dangereuses. « *Il apparaît en 1998 dans un village malaisien de population musulmane, qui abrite cependant un élevage industriel de porcs destinés aux mar-*

NANDAGONZAGUE

« DANS UN MILIEU PAUVRE EN BIODIVERSITÉ, LE PATHOGÈNE S'ADAPTE AUX QUELQUES ESPÈCES PRÉSENTES ET SA PRÉVALENCE PEUT DONC S'ÉLEVER »

Benjamin Roche, biologiste, directeur de recherches à l'Institut de recherche pour le développement (IRD)

DINO FRACCHIA/REA

chés chinois et singapourien, explique Serge Morand. *Un groupe de chauves-souris, que de nouvelles plantations de palmiers à huile ont privées de leur habitat, s'installe près de l'élevage, attiré par le garde-manger que constituent les manguiers autour des enclos. Les déjections des chauves-souris, réservoir naturel d'un virus inconnu, contaminent les porcs, qui à leur tour contaminent les travailleurs de l'élevage. Le premier foyer épidémique connu s'allume, avec 300 cas et plus de 100 décès précédés d'encéphalites foudroyantes. Les exportations de viande et d'animaux vivants vont ensuite permettre la diffusion du virus dans toute l'Asie du Sud-Est. »*

Des épidémies de dengue en France métropolitaine

Depuis 2001, l'Inde a subi six flambées épidémiques causées par le virus Nipah, dont la dernière en septembre dernier, et le Bangladesh une chaque année. Le taux de mortalité se situe entre 40 et 75 %, selon l'OMS, car il n'existe ni vaccin ni traitement. Heureusement, Nipah se transmet encore difficilement d'humain à humain. L'émergence du covid-19 sur le marché de Wuhan, en Chine, a aussi mis en lumière les risques engendrés par l'élevage d'animaux sauvages à différentes fins (fourrure, viande, médecine traditionnelle ou animaux de compagnie), qui se développe notamment en Chine.

Le changement climatique contribue aussi à la « globalisation » des maladies zoonotiques, dont certaines, autrefois cantonnées aux régions tropicales, émergent en Europe. « *Originaire d'Asie, le moustique tigre est arrivé en France, dans les Alpes-Maritimes, en 2004,* indique Coralie Martin. *Désormais, les trois quarts du pays sont touchés.* » Or, contrairement à ses inoffensifs congénères métropolitains, cette espèce est un vecteur de la dengue, du chikungunya et du virus zika. « *En piquant un voyageur arrivé malade en France métropolitaine, il s'infecte et peut ainsi transmettre le virus à d'autres personnes. Voilà comment on se retrouve avec des épidémies de dengue en France métropolitaine!* » La biologiste se récrie néanmoins contre une vision anthropocentrée: « *L'animal n'a rien demandé,* plaide-t-elle. *Souvent d'ailleurs, même porteur d'un agent pathogène, il n'est pas malade. Le problème, c'est l'humain!* »

ÉLIANE PATRIARCA

La santé des uns fait la santé des autres

En octobre 2020, en pleine crise du covid-19, les experts de la Plate-forme intergouvernementale sur la biodiversité (IPBES) ont préconisé d'adopter au plus vite l'approche « One Health » (« Une seule santé »). « *Ce concept repose sur le constat de l'interdépendance de la santé humaine, animale et environnementale et vise à impliquer des scientifiques de différents domaines dans une réflexion et une action communes*, explique Benjamin Roche, biologiste de l'Institut de recherche pour le développement (IRD). *L'approche a été adoptée en 2010 par l'Organisation mondiale de la santé, l'Organisation mondiale de la santé animale (Omsa) et l'Organisation des Nations unies pour l'agriculture et l'alimentation (FAO). Mais les efforts restaient sporadiques. Avec la crise du covid-19, elle s'est imposée au niveau international.* »

Le Programme des nations unies pour l'environnement (PNUE) a rejoint la coalition One Health en 2022. « *Développer un vaccin contre chaque virus s'avère illusoire, il faut se focaliser sur la prévention, plus efficace et moins coûteuse* », poursuit le biologiste.

La première initiative internationale One Health a vu le jour en 2021. Portée par l'IRD, l'Institut national de la recherche agronomique (Inrae) et le Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad), Prezode regroupe aujourd'hui 200 instituts et 25 gouvernements. Un premier projet, AfriCam, concerne le Cambodge et quatre pays africains, où doivent être déployés ou renforcés des systèmes de détection précoce d'émergence des zoonoses. Un autre concerne Haïti, le Mexique, le Costa Rica, la République démocratique du Congo, le Laos et la Thaïlande. Pour chaque projet, les chercheurs réaliseront un état des lieux avec les habitants pour déterminer les facteurs de risque, dont les interactions avec la faune sauvage. Des stratégies de prévention seront élaborées en co-construction.

Par exemple, si les communautés chassent pour se nourrir, l'objectif ne sera pas l'interdiction, mais plutôt l'arrêt du dépeçage des carcasses à mains nues. E. P.

Gwenaël Vourc'h, François Moutou, Serge Morand, Elsa Jourdain, *Les Zoonoses. Ces maladies qui nous lient aux animaux*, Quae, 2021

Serge Morand, François Moutou, Céline Richomme, *Faune sauvage, biodiversité et santé : quels défis?* Quae, 2021

Interview

STÉPHANIE RUPHY Professeure de philosophie des sciences à l'École normale supérieure–Université PSL, directrice de l'Office français de l'intégrité scientifique (Ofis)

« Un article frauduleux peut avoir un impact durable sur la société »

Certains chercheurs cèdent à la tentation de plagier, falsifier ou fabriquer des données. Aidée par des outils numériques de détection, la communauté scientifique s'organise aujourd'hui pour lutter contre ce phénomène, qui mine la confiance du grand public en la science.

On a pu le constater lors de la pandémie de Covid-19 ou à l'occasion de la publication des rapports du Giec sur le réchauffement climatique : les résultats de la recherche sont mis en doute, notamment sur les réseaux sociaux. Y a-t-il une crise de confiance entre les scientifiques et le reste de la société ?

Si l'on se fie à des enquêtes récentes comme celle du Cevipof (Centre de recherches politiques de Sciences Po) en 2021, la confiance envers la science et les scientifiques reste relativement élevée, à plus de 75 %. Ce qui a changé, c'est que la parole scientifique se déploie désormais dans de nouvelles sphères comme les réseaux sociaux, où elle se trouve concurrencée par d'autres types de discours. Il y a là une certaine défiance, qui pourrait s'expliquer par la mauvaise compréhension de la science, sa complexité, la peur de technologies jugées dangereuses comme le nucléaire ou l'IA, ou de l'influence supposée de certains lobbys… Mais aussi par de réels cas de fraude – même s'ils sont rares.

ARNAUD MEYER/LEEXTRA

Quelles sont les entorses à l'intégrité ?

Le plus haut niveau de gravité, ce sont les fraudes, c'est-à-dire la fabrication, la falsification de données ou le plagiat. Elles ont parfois un impact durable sur la société. Ainsi, en 1998, Andrew Wakefield, un chercheur britannique, a publié dans la revue *The Lancet* un article faisant le lien entre le vaccin contre la rougeole et certaines formes d'autisme. Il s'est avéré que l'article était frauduleux. En conséquence, la revue l'a retiré en 2010. Pourtant, il continue à être diffusé par les mouvements antivaccins, ce qui dissuade parfois certaines personnes de se faire vacciner.

Un autre cas de fraude retentissant concerne un chercheur néerlandais en psychologie sociale, Diederik Stapel : des enquêtes ont montré que plus d'une cinquantaine de ses articles contenaient des données manipulées ou même inventées *[censées être issues de questionnaires psychologiques notamment, ndlr].* Quant au plagiat, il peut apparaître dans une thèse de doctorat. Le comité d'éthique de l'École polytechnique a demandé pour cette raison le retrait du doctorat *[en sciences de gestion et épistémologie appliquée, ndlr]* obtenu en 2016 par l'essayiste et conférencier Idriss Aberkane.

> On dit souvent que pour faire carrière, les chercheurs n'ont pas le choix : publier ou périr. Un impératif qui peut créer des tensions.

Ce sont là des cas extrêmes…
Certes, mais au-delà, il y a une vaste zone grise de pratiques discutables. Par exemple, qui signe un article scientifique, et dans quel ordre ? Il arrive que de jeunes chercheurs apparaissent dans la liste d'auteurs d'une façon qui ne reflète pas le travail qu'ils ont accompli. Or, publier est important pour la carrière des scientifiques. Du côté des résultats, on peut constater parfois un « embellissement » des images, facilité par des outils comme Photoshop qui permettent de les retoucher facilement. Ou encore, il y a ce que les Anglo-Saxons appellent le *cherry-picking*, qui consiste à ne sélectionner que les données qui confortent fortement une thèse, en laissant de côté d'autres qui inviteraient à la nuancer.

Qu'est-ce qui peut amener les scientifiques à frauder ?
Il n'y a pas encore, à ma connaissance, de travaux de recherche ou d'enquête permettant de faire des affirmations étayées empiriquement, mais on peut penser que l'avancement dans la carrière personnelle, l'obtention de crédits pour son laboratoire ou de prix scientifiques prestigieux peuvent être des motifs. On dit souvent que pour faire carrière, les scientifiques n'ont pas le choix : *publish or perish* (« publier ou périr »). Il faut publier beaucoup. Cet impératif peut créer des tensions avec les attentes en matière d'intégrité. Aujourd'hui, cependant, les institutions scientifiques s'engagent dans une évaluation plus qualitative de la recherche.

La fraude est-elle fréquente ?
On ne dispose pas encore de beaucoup d'informations à grande échelle. Une étude menée de manière anonyme auprès de chercheurs aux Pays-Bas et publiée en 2022 dans la revue *Plos One* donne quand même une première idée : sur près de 7 000 chercheurs sondés, 8 % ont reconnu avoir fabriqué ou falsifié des données au cours des trois dernières années. En France, on disposera bientôt d'éléments à l'échelle nationale, car la loi de programmation de la recherche pour les années 2021 à 2030 demande aux établissements de faire remonter des informations concernant les signalements de manquements à l'intégrité.

On a l'impression que la situation empire…
C'est difficile à dire. Si l'on observe davantage de tricheries aujourd'hui, c'est parce qu'on a mis au point des outils numériques pour les détecter, comme le Problematic Paper Screener du chercheur toulousain Guillaume Cabanac *[qui repère par exemple dans les publications des indices de plagiat, ou démasque des articles générés par des logiciels, ndlr]*. Et les scientifiques eux-mêmes peuvent améliorer cette détection, en jouant un rôle comparable à celui d'un lanceur d'alerte. Dans le processus d'édition habituel, lorsqu'un article de recherche est relu et critiqué avant publication par d'autres scientifiques, il n'est pas toujours possible de détecter des fraudes ou des pratiques douteuses. Un site comme PubPeer permet aux chercheurs de signaler les entorses à l'intégrité dans des articles déjà publiés. Quant au site Retraction Watch, il recense les articles retirés par les éditeurs après leur publication, pour cause d'erreurs ou de fraude. Enfin, on attend aujourd'hui des scientifiques qu'ils facilitent l'accès à leurs données. Cela peut avoir un effet dissuasif : il devient plus risqué de les manipuler. Ainsi, les filtres qui assurent la fiabilité de la science se diversifient et se renforcent.

> « En France, la loi exige désormais que les doctorants prêtent serment d'intégrité scientifique

Et du côté institutionnel, quels sont les garde-fous ?
Il y a eu en France une réelle prise de conscience sur la question de l'intégrité des chercheurs, et une impulsion du politique. En 2016, le gouvernement a commandé un rapport à Pierre Corvol, de l'Académie des sciences, lequel a préconisé la création d'une structure dédiée, l'Office français de l'intégrité scientifique, qui est née en 2017. Depuis, dans chaque établissement de recherche, il y a une personne référente pour l'intégrité scientifique. Et la loi enjoint aux doctorants de prêter serment d'intégrité scientifique. Nous sommes le seul pays au monde à l'exiger.

Depuis l'arrivée de ChatGPT, on parle beaucoup de l'IA. Peut-on l'utiliser pour écrire des articles scientifiques ?
L'usage n'est en général pas proscrit, à condition toutefois de préciser comment l'outil a été utilisé. D'ailleurs, de grandes revues comme *Nature* ou *Science* ont déjà publié des lignes directrices pour sa bonne utilisation. Et quel que soit cet usage, par exemple pour alimenter un état de l'art dans un domaine donné, le scientifique reste entièrement responsable de sa publication et endosse les erreurs éventuelles de l'IA. Mais d'autres questions passionnantes vont sans doute bientôt se poser : par exemple, un outil d'IA pourra-t-il être considéré comme étant à l'origine de découvertes en science ?

PROPOS RECUEILLIS PAR JEAN-FRANÇOIS HAÏT

GETTY IMAGES

Trompées par l'odeur et l'apparence du plastique, les tortues l'ingèrent volontiers.

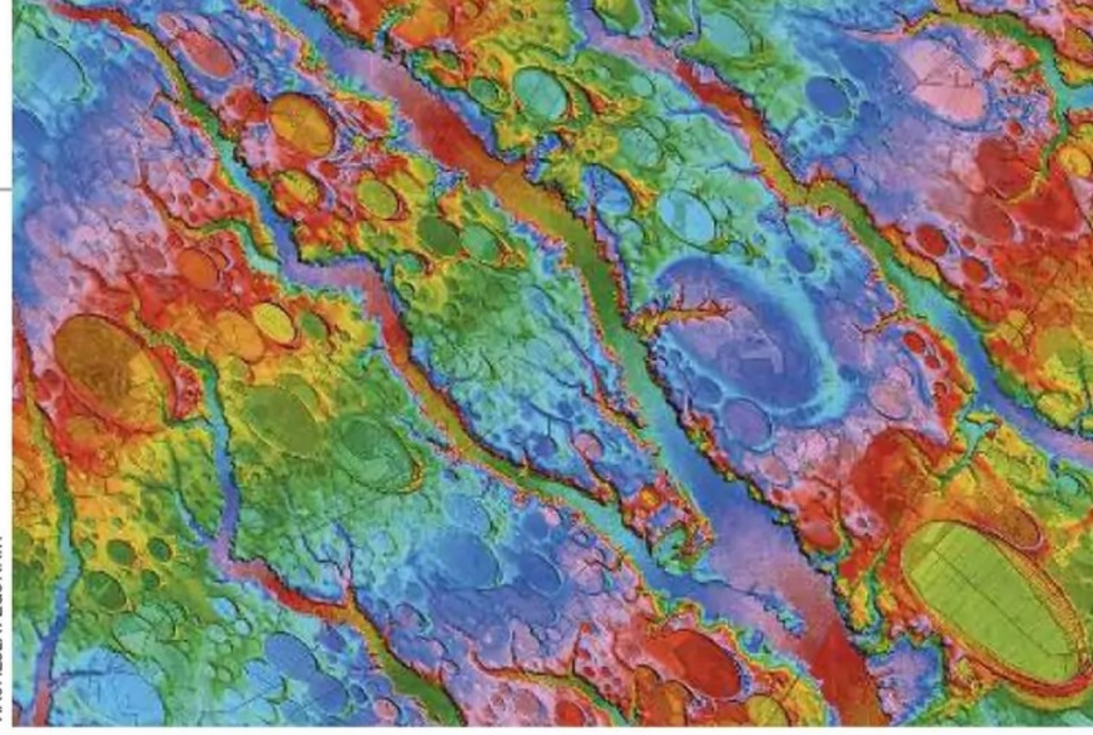
ENVIRONNEMENT

Des océans submergés par le plastique

Ce sont les océanographes qui ont sonné l'alerte : à la fin du XXe siècle, ils identifient dans l'océan Pacifique une zone saturée en débris plastiques de trois millions de kilomètres carrés. Mais ce « septième continent » n'est que la partie émergée de l'iceberg. *« Sur les 200 millions de tonnes de plastique qui se retrouvent aujourd'hui dans les océans, environ 80 millions sont dans l'eau et 117 millions dans les sédiments marins. Seul 0,3 million flotte en surface »,* estime Jeroen Sonke, directeur de recherche CNRS à l'université de Toulouse 3. Les plastiques visibles à l'œil nu – ou macroplastiques – ne représentent d'ailleurs qu'une partie de cette pollution. L'essentiel consiste en de plus petites structures – les microplastiques (< 5 millimètres) et les nanoplastiques (< 1 micromètre) –, qui résultent de la dégradation des matériaux sous l'effet des rayonnements solaires et des pressions mécaniques, comme celles exercées par les pierres dans les rivières ou les vagues dans la mer. *« Les principaux constituants du plastique se dégradent très lentement. Ils perdent 1 % de leur poids chaque année »,* souligne le chercheur. *« Même les bactéries ne parviennent pas à les digérer »,* complète Pascale Fabre, directrice de recherche à l'université de Montpellier et fondatrice du groupement de recherche Polymères et Océans. Les plastiques les plus abondants sont les polyéthylènes et les polypropylènes, issus de la transformation d'hydrocarbures. *« Le paradoxe du plastique est qu'il dure très longtemps alors qu'on ne l'utilise parfois que quelques minutes,* constate Pascale Fabre. *Et il s'accumule : c'est cela, le principal danger. »* Les microplastiques avalés par les organismes marins – poissons, crustacés ou plancton – provoquent une inflammation de leur tube digestif. Une maladie qui porte un nom, la plasticose, depuis qu'une équipe australienne l'a décrite chez des oiseaux marins, les puffins, souffrant de fibroses digestives pouvant altérer la croissance et la survie de l'espèce. Ingérées par les humains, ces molécules pourraient induire des maladies inflammatoires du côlon et altérer le microbiote intestinal. Encore peu étudiés, les nanoplastiques, qui traversent les tissus et rejoignent la circulation sanguine, inquiètent encore davantage : ce pourrait être des perturbateurs endocriniens.

Face à cette catastrophe, comment agir ? *« La priorité est de baisser notre production de plastiques – 10 milliards de tonnes depuis les années 1950 – puis de repenser leur conception en y intégrant une réflexion sur leur fin de vie,* remarque Pascale Fabre. *Certains plastiques recyclés sont en effet plus toxiques que leur version de départ, et ceux qui sont issus de matière végétale, comme l'amidon de maïs ou la canne à sucre, ne sont pas toujours biodégradables dans la nature. »* Une réduction qui permettra de combattre un autre fléau : la quantité de particules présentes sur les continents et dans l'atmosphère, encore peu débattue, mais tout aussi importante et dangereuse que celle des océans.

RIVA BRINET-SPIESSER



VIACHESLAV ZGONNIK

Les émanations d'hydrogène blanc dessinent souvent sur la surface terrestre des «cercles de fées » – des zones indécelables à l'œil nu de forme arrondie (ici, détectées par Lidar aux États-Unis, en Caroline du Nord).

ENERGIE

Plus vert que l'hydrogène vert, l'hydrogène blanc

Tenons-nous enfin la source d'énergie propre, accessible et rentable qui triomphera des hydrocarbures ? Jusqu'à présent, l'hydrogène n'est utilisé qu'à la marge, car sa production est difficile. Elle demande de casser des molécules d'eau, un procédé peu écologique mis en œuvre grâce à une débauche d'énergie obtenue à partir de charbon – pour l'hydrogène « gris » – ou d'énergies renouvelables – pour l'hydrogène « vert ».
Mais voici que l'hydrogène « blanc » fait surface. Nul besoin d'énergie pour le fabriquer : il émane naturellement des entrailles de la terre. D'abord détecté dans les dorsales océaniques, il est de plus en plus souvent déniché au cœur même des continents, notamment dans les régions où abondent des éléments radioactifs ou des roches riches en fer réagissant avec l'eau. On en a repéré en Australie, aux États-Unis, à Oman… et même en France. La Nouvelle-Calédonie est un lieu avéré, tandis que le piémont pyrénéen et la Lorraine font l'objet d'explorations prometteuses. Mais attention aux effets d'annonce. « *Il faut trouver le juste milieu entre les passions, vitales pour générer l'enthousiasme, et la raison scientifique qui ramène les acteurs à la réalité* », rappelle le géochimiste Laurent Truche, professeur à l'université Grenoble Alpes.
Alors, à quand l'extraction industrielle ? *« On n'en est pas là,* tempère Isabelle Moretti, professeure à l'université de Pau et des pays de l'Adour. *Il faut environ dix ans entre la détection d'une source et sa mise en production. »* D'autres obstacles se dressent. La recherche des sites potentiels prend du temps. *« Encore faudrait-il que nous nous intéressions de nouveau au sous-sol, ce qui n'est plus le cas en France »,* regrette Laurent Truche. Et des multiples processus chimiques mis en œuvre résultent souvent un mélange d'hydrogène et d'autres gaz comme le méthane, qu'il faut savoir séparer. Autre interrogation : à quelle température, et en combien de temps, l'hydrogène est-il émis dans les roches ? Par ailleurs, la législation doit être adaptée afin d'autoriser certains forages. Autant de sujets qui ont été débattus fin novembre en Australie par des chercheurs et ingénieurs, nombreux à s'engager sur la piste de ce nouvel or blanc.

JACQUES-OLIVIER BARUCH

NUTRITION

ALIMENTS ULTRA-TRANSFORMÉS : MIEUX VAUT S'EN PASSER

Céréales du petit-déjeuner, lard sans viande, sodas, plats prêts à consommer… Dans les années 2010, les scientifiques ont décidé de classer tous ces produits dans une nouvelle catégorie : les aliments ultra-transformés, qui représentent près d'un tiers des calories consommées en France. Issues de procédés innovants, ces préparations industrielles sont réalisées à base d'aliments dont la structure a été profondément modifiée, tant du point de vue physique que chimique, certains des ingrédients entrant dans leur composition étant même des substances industrielles – isolats de protéines, sirop de glucose, etc. En outre, elles contiennent presque toutes une kyrielle d'arômes artificiels et surtout d'additifs loin d'être anodins.
Depuis 2015, différentes études épidémiologiques ont montré que leur consommation régulière est associée à un risque accru de maladies chroniques (diabète, obésité) et de troubles cardiovasculaires, ainsi qu'à une augmentation de certains cancers (sein, côlon). Généralement riches en sucres ajoutés, en sel et en graisses saturées, de densité énergétique élevée, ces aliments affichent en revanche une faible teneur en protéines et en fibres. Mais d'autres facteurs contribueraient à leur effet délétère sur la santé. En altérant la structure de l'aliment, les procédés industriels accélèrent l'absorption des glucides par l'organisme. Par ailleurs, la consommation d'aliments riches en additifs, notamment les émulsifiants, diminuerait la diversité du microbiote intestinal. Voilà pourquoi les nutritionnistes préconisent des mesures pour réguler leur consommation : signalement par un logo nutritionnel, interdiction de vente dans les lieux publics, taxation, bannissement du marketing et de la publicité ciblant les enfants.

ISABELLE DO O'GOMES

SHUTTERSTOCK

Les préparations industrielles comportent très souvent des ingrédients chimiquement et physiquement modifiés, qui altèrent la digestion.

EN IMAGES

PAGES RÉALISÉES PAR MARIE PARRA

Incroyables vivants !

La nature a du génie ! Des profondeurs océaniques à la canopée, quelques-unes des plus intéressantes découvertes de la dernière décennie sur ses habitants.

Jeune baleine à bosse (*Megaptera novaeangliae*), avec sa mère (presque invisible à l'arrière-plan).

TONY WU/NATUREPL BACCEGA

CÉTACÉS

LES BALEINES ONT L'OREILLE MUSICALE

Au cœur des océans résonne une symphonie singulière : celle des cétacés, dont on continue à décrypter les chants, sifflements et autres clics. Notamment les vocalises des baleines à bosse, qui varient d'un bout à l'autre du globe en fonction des individus et des groupes, et évoluent au cours de la vie. Les chants s'imprègnent en effet des rencontres avec d'autres populations, croisées au cours des migrations, auxquelles les baleines empruntent notes et mélodies. Des chercheurs ont même découvert que les petits et leur mère chuchotent pour rester discrets face à d'éventuels prédateurs. Autre enseignement récent, et plus singulier : les puissantes vocalises des rorquals pourraient nous éclairer sur la structure de la croûte océanique, d'après une étude de l'université d'État de l'Oregon publiée en 2021 dans la revue *Science*. Les ondes qu'ils émettent traversent en effet les différentes couches de la croûte, leur vitesse de propagation renseignant les scientifiques sur l'épaisseur et la composition de celles-ci.

FOURMI DE FEU

UNE INSATIABLE RAVAGEUSE

Plus de 3 500 espèces animales et végétales sont considérées comme envahissantes, c'est-à-dire qu'elles s'établissent dans de nouvelles régions au détriment des espèces locales. Originaire d'Amérique du Sud, la fourmi de feu *Solenopsis invicta* vient ainsi d'être observée en Europe. Des monticules formés par des supercolonies de dizaines de milliers d'ouvrières jonchent la banlieue de Syracuse, en Sicile. En moins d'un siècle, cet arthropode vorace et omnivore a notamment colonisé le Mexique, les États-Unis et l'Australie, s'attaquant aux cultures mais aussi aux équipements électriques et de communication. Chaque année, deux cents nouvelles espèces envahissantes sont recensées. Véritables menaces pour la biodiversité, elles affectent parfois la sécurité alimentaire et… la santé humaine. Le venin de la fourmi de feu peut notamment entraîner un choc anaphylactique.

MICHAEL DURHAM / MINDEN PICTURES / BIOSPHOTO

La redoutable fourmi de feu pourrait désormais se répandre en Europe.

WILLI ROLFES / BIA / MINDEN PICTURES / BIOSPHOTO

Des racines aux frondaisons, les arbres échangent en permanence avec leur environnement.

ARBRES

CONFÉRENCES AU SOMMET

Les arbres ne se déplacent pas… mais ils communiquent, c'est un fait désormais avéré. Grâce à leurs racines, dont l'association symbiotique avec certains champignons – la mycorhize – leur assure un bon approvisionnement en éléments nutritifs puisés dans le sol. Ainsi que par les molécules qu'ils émettent en cas de menace, afin d'avertir leurs congénères ou d'éloigner un prédateur. Mais en levant les yeux, on s'aperçoit que leurs dialogues ont aussi un effet sur les cimes. Souvent, en effet, les frondaisons sont séparées par des espaces de quelques centimètres, qui offrent un faisceau de lumière au couvert végétal et limitent la transmission des maladies et insectes. Encore mystérieux, ces hiatus appelés « timidités » pourraient résulter de signaux moléculaires émis au sein même du réseau mycorhizien.

MÉDUSE

APPRENDRE SANS CERVEAU

Dépourvue de cerveau, la petite méduse caribéenne *Tripedalia cystophora* est pourtant capable d'apprendre très rapidement à partir de ses expériences passées. Comment? Grâce à quatre complexes « œil-neurones », les rhopalies, répartis autour de sa cloche. En réponse à un stimulus visuel ou sensoriel, ces rhopalies émettent un faible signal électrique qui engendre une réponse motrice, pour éviter un obstacle par exemple. Étonnant… mais peut-être moins que les prouesses du blob, organisme unicellulaire totalement dépourvu de système nerveux, qui transmet ses apprentissages à ses congénères en fusionnant avec eux.

JAN BIELECKI

Tripedalia cystophora a démontré des capacités d'apprentissage surprenantes.

Des raisons D'ESPÉRER

En quelques années, les révolutions en matière de santé se sont succédé, comme en a témoigné avec éclat la mise au point, en quelques mois, d'un vaccin contre le covid-19. Mais l'ARN a bien d'autres tours thérapeutiques dans son sac, notamment contre les cancers ou les affections héréditaires. Autre bouleversement, celui de l'intelligence artificielle. Parions que l'irruption de celle-ci dans nos vies engendrera un avenir meilleur...

SHUTTERSTOCK

> NUMÉRIQUE

L'IA en révolution permanente

Des débuts laborieux, un essor fulgurant : en quelques années, l'intelligence artificielle a colonisé nos écrans et nos esprits, multipliant les inventions fracassantes tel ChatGPT. Et les problèmes éthiques.

On fait généralement remonter la naissance de l'intelligence artificielle – IA pour les intimes – à la publication par le mathématicien britannique Alan Turing, en 1950, d'un article intitulé « Machines informatiques et intelligence ». L'IA serait donc septuagénaire... Il a fallu pourtant attendre 1997 pour que le public découvre son premier coup d'éclat : la victoire à la loyale de Deep Blue, un ordinateur conçu par IBM, sur Garry Kasparov, champion du monde en titre du jeu d'échecs, au cours d'un match en six manches.

Mais il s'agissait là d'une victoire de l'IA à l'ancienne. Deep Blue l'a emporté en analysant jusqu'à 330 millions de positions futures par seconde. Surtout, son logiciel incorporait une connaissance intime du jeu d'échecs. Cette IA « cognitiviste », basée sur la représentation et la manipulation de connaissances, restera longtemps l'approche dominante.

Au même moment, pourtant, une autre démarche faisait plus discrètement son chemin : l'apprentissage automatique *(machine learning)*, consistant à créer des algorithmes qui ne savent rien au départ du problème à résoudre, mais apprennent à partir d'exemples via des méthodes statistiques. Dès les années 1990, l'une de ses approches, l'apprentissage profond ou *deep learning*, se montrera très prometteuse. « *La dernière décennie est jalonnée de percées reposant sur l'apprentissage profond, qui s'appuie sur des réseaux de neurones artificiels,* confirme Francis Bach, chercheur à Inria et au département informatique de l'École normale supérieure. *Ses performances dépassent aujourd'hui un seuil qui la rend très largement dominante sur les autres approches utilisées en IA.* »

Signe des temps : après les échecs, c'est au tour du jeu de go, qui résistait depuis vingt ans aux attaques de l'IA classique, de tomber face à un logiciel relevant du *deep learning*. AlphaGo, de Google DeepMind, bat en 2016 le champion sud-coréen Lee Sedol, puis en 2017 le Chinois Ke Jie, numéro un mondial de la discipline, sur un score sans appel de trois à zéro. Autre marqueur temporel, le cru 2018 du prix Alan Turing, attribué chaque année par l'ACM (Association for Computing Machinery), la plus prestigieuse société savante consacrée à l'informatique, est décerné à un trio de pionniers de l'apprentissage profond : les Canadiens Geoffrey Hinton (professeur à l'université de Toronto) et Yoshua Bengio (professeur à l'université de Montréal), ainsi que le Français Yann Le Cun (professeur à la New York University et Chief AI Scientist de Facebook).

Aide au diagnostic, tri des déchets : les machines voient, et c'est utile

Ces défricheurs ont revisité avec succès la piste des réseaux de neurones artificiels explorée très tôt, avec notamment un certain Perceptron de Frank Rosenblatt (université Cornell, 1957), avant d'être enterrée. L'idée est d'imiter – dans les grandes lignes – le fonctionnement du système nerveux, le plus souvent par logiciel. Un réseau de neurones artificiels est généralement organisé en couches, dont chaque neurone reçoit en entrée les signaux

SHUTTERSTOCK

Dopés à l'intelligence artificielle, les logiciels de reconnaissance faciale peuvent identifier une personne de façon quasiment parfaite.

issus de neurones de la couche précédente auxquels il est connecté, et calcule une fonction qui intègre l'information collectée, dont le résultat constitue son signal de sortie, destiné à des neurones de la couche suivante. Dans cette fonction interviennent des « poids », des coefficients déterminant l'importance attribuée à chaque neurone amont. C'est en modifiant ces paramètres qu'un réseau apprend.

À partir des années 1980, Geoffrey Hinton, Yann Le Cun et Yoshua Bengio réanimment et prolongent l'idée du Perceptron. « *Yann Le Cun est le premier à utiliser une nouvelle technique pour mettre à jour au cours de l'apprentissage les poids d'un réseau (la "rétropropagation du gradient"), qui s'avèrera très efficace,* explique Marc Schoenauer, directeur de recherche au centre de recherches Inria, à Saclay. *Avec elle, il obtient en 1989 d'excellents résultats pour la lecture automatique des codes postaux sur le courrier.* » Dans le même temps, il conçoit un nouveau type de réseau, le « réseau de neurones convolutif », dont l'architecture est inspirée du cortex visuel,

INRIA

« LA DERNIÈRE DÉCENNIE EST JALONNÉE DE PERCÉES REPOSANT SUR LE DEEP LEARNING, UNE TECHNIQUE QUI S'APPUIE SUR DES RÉSEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS »

Francis Bach, Inria

qui va révolutionner notamment la vision artificielle. « *En 2012,* ajoute le chercheur, *lors d'une compétition annuelle remportée haut la main, Geoffrey Hinton et son équipe démontrent la supériorité de l'apprentissage profond en reconnaissance d'image. Cela fait grand bruit.* » Il s'agissait, après apprentissage sur plus d'un million d'images d'items classés en mille catégories (chats, chiens…), de reconnaître ceux présents dans un nouveau jeu d'images. « *Le réseau de neurones convolutif AlexNet de Geoffrey Hinton réalise un taux d'erreur de 15,3 % dans l'un des classements, avec près de 11 points d'avance sur le suivant,* précise Marc Schoenauer. *Un ou deux ans plus tard, plus personne ne présentait dans cette compétition une solution ne reposant pas sur l'apprentissage profond. Et les taux d'erreur se sont ensuite effondrés.* »

Depuis, la vision artificielle est entrée dans nos vies, et d'abord dans nos smartphones. Nous ne nous étonnons même plus que leur caméra détecte les visages souriants, que des applis identifient des plantes, des minéraux ◆◆◆

JASON ALLEN

◆◆◆ ou encore des produits. Des usages plus sérieux ont émergé, comme l'aide au diagnostic à partir d'images médicales ou des voitures capables de repérer un piéton. Cette technologie se glisse encore dans l'industrie, notamment pour le contrôle qualité, et jusqu'au tri des déchets recyclables. Après l'émerveillement, nous avons intégré le fait que, désormais, les machines voient, assez bien pour que cela soit utile.

L'œuvre *Théâtre d'opéra spatial*, hybridant thèmes spatiaux et personnages en costumes victoriens, a été obtenue par son « créateur » Jason Allen grâce à la génération d'images par une IA, Midjourney. Elle a remporté un premier prix à la foire d'État du Colorado.

À l'aide de l'IA, des protéines en veux-tu en voilà

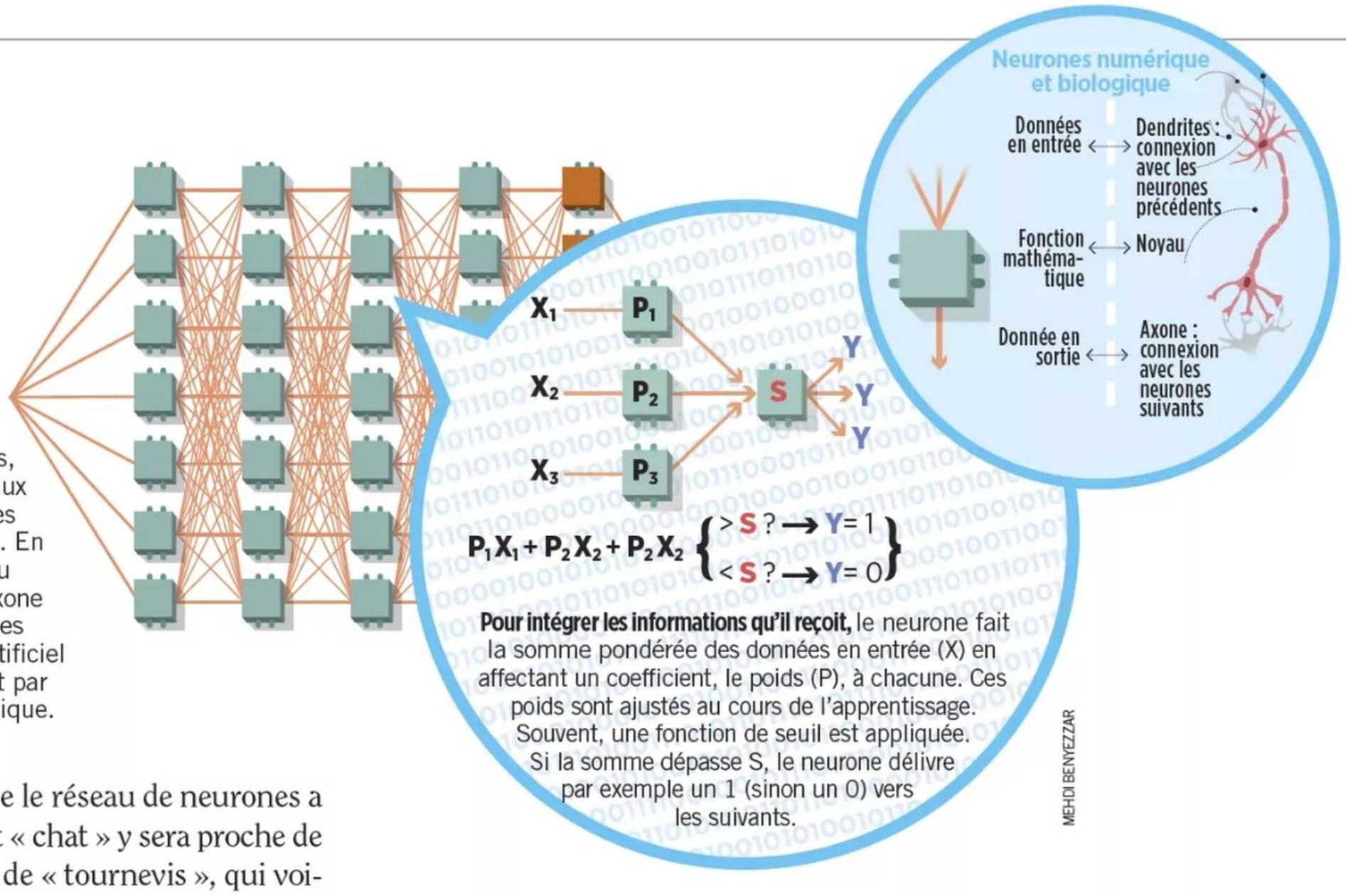
Prédire la forme des protéines et en concevoir de nouvelles, par exemple des antibiotiques ou des médicaments personnalisés : l'IA révolutionne la biologie, parvenant à accomplir en quelques heures ce qui auparavant demandait aux chercheurs des années de travail. Grosses molécules codées par les gènes, les protéines sont constituées d'une chaîne de plusieurs centaines de molécules plus petites, les acides aminés. Par leurs interactions, ceux-ci sont à l'origine de la forme en 3D des protéines : hydrophobes, ils s'attirent ; dans le cas contraire, ils se repoussent… Et la protéine se replie, jusqu'à une structure stable. Nourri de milliers d'exemples grâce aux nombreux génomes séquencés dans le monde entier, le programme Alphafold 2 de l'entreprise DeepMind (filiale de Google) est capable de deviner les interactions entre ces éléments de la chaîne. Il a déjà prédit 700 millions de structures. Quel intérêt ? C'est que la conformation d'une protéine témoigne de ses propriétés, un peu comme on devine à quoi sert un outil en analysant sa forme. Les chercheurs envisagent donc de pouvoir créer des protéines sur mesure. Toutefois, seule la conformation de 60 % environ d'entre elles peut être prédite par Alphafold2. Ce n'est notamment pas le cas des anticorps, activés en temps réel par notre organisme. MARIE PARRA

Encore plus fort, des équipes parviennent depuis peu à réaliser l'opération inverse de la vision. En janvier 2021, c'est OpenAI, en Californie, qui a créé la surprise en rendant public un certain DALL-E, qui produit des images à partir d'une description. Il a depuis été rejoint par des concurrents comme Midjourney et Stable Diffusion. *« La grande révolution en cours est celle de l'IA dite générative,* assure Marc Schoenauer. *On sait aujourd'hui générer du texte à partir de texte, mais aussi des images, et même des vidéos. »* Mauvaise nouvelle : certaines vidéos font dire n'importe quoi à un personnage… public ou non. Ces fameux *deep fakes*…

L'IA nous en met donc plein la vue. Mais elle nous épate encore plus, ces derniers temps, en maniant le langage… au point qu'elle nous donne l'impression fallacieuse qu'elle comprend et pense. *« La première étape notable dans le domaine du traitement des langues a été la publication en 2013 de word2vec,* estime Benoît Sagot, responsable de l'équipe ALMAnaCH d'Inria Paris, dédiée au traitement du langage naturel. *Conçu par une équipe de Google, ce réseau de neurones produit une représentation vectorielle des mots, c'est-à-dire qu'il les place dans un espace de manière à rendre compte de leur proximité sémantique. »* Dans cet espace, par exemple à mille dimensions, les mots sont situés en fonction de leur proximité les uns avec les autres, constatée dans une grande quantité

Neurones en miroir

Le fonctionnement des neurones numériques s'inspire de celui des neurones biologiques : ces derniers reçoivent par leurs prolongements, les dendrites, des signaux électriques des neurones qui leur sont connectés. En réponse, ils envoient, ou non, un signal dans l'axone qui les relie aux neurones suivants. Le neurone artificiel mime ce comportement par une fonction mathématique.



MEHDI BENYEZZAR

de textes sur laquelle le réseau de neurones a été entraîné. Le mot « chat » y sera proche de « chien », mais loin de « tournevis », qui voisinera avec « marteau ». Traduits en nombres, les mots peuvent alors être traités par d'autres réseaux de neurones.

ChatGPT compare sans sourciller œufs de poule et œufs de vache

Malheureusement, les langues ne sont pas avares d'homonymies, polysémies et autres ambigüités. *« De nombreux travaux ont ensuite visé à dépasser cette représentation unique pour un mot, à tenir compte du contexte dans lequel il apparaît »,* poursuit Benoît Sagot. Une IA ne peut correctement traduire ou résumer, encore moins dialoguer, si elle confond mine de crayon, mine de charbon… et mine de rien. *« L'avancée la plus spectaculaire,* indique le chercheur, *a été l'invention en 2017, à nouveau par une équipe de Google, d'une architecture de réseau de neurones appelée "transformeur". »* Qui sait différencier « mine » et « mine ». Le transformeur va permettre de réaliser des grands modèles de langage (ou LLM, pour Large Language Models) qui vont faire parler d'eux. En 2018, OpenAI rend public un certain GPT-1 (Generative Pre-trained Transformer, soit: transformeur génératif pré-entraîné). Puis viendra GPT-2, plus puissant, et en 2020 l'énorme GPT-3, qui compte 175 milliards de paramètres.

Après entraînement sur des montagnes de textes (près de 500 milliards de mots pour GPT-3), ces LLM sont capables de deviner le mot le plus probable, statistiquement, après une séquence de mots fournie par l'utilisateur, un *prompt*. Ils peuvent ainsi produire des textes aussi longs que l'on voudra. Deux améliorations permettent de transformer un LLM en un véritable robot conversationnel, un *chatbot*. Biberonnés de textes surtout glanés sur internet, les LLM véhiculent parfois des points de vue douteux, voire nauséabonds (propos racistes, sexistes…). On corrige cela grâce à l'apprentissage « par renforcement »: des humains notent ou trient des productions du modèle, ce qui provoque une révision de ses paramètres. *« On cherche à aligner ce que génère le modèle sur ce qu'un utilisateur humain attend,* explique Benoît Sagot. *On lui forge en quelque sorte un petit surmoi. »* D'autre part, pour qu'un modèle apprenne à converser, on le gave de dialogues, produits ou au moins validés par des humains.

P. IMBERT/COLLÈGE DE FRANCE

« ON CHERCHE À ALIGNER CE QUE GÉNÈRE LE MODÈLE SUR LES ATTENTES D'UN UTILISATEUR HUMAIN. ON LUI FORGE EN QUELQUE SORTE UN PETIT SURMOI »

Benoît Sagot, directeur de recherche Inria, professeur au Collège de France

C'est ainsi que OpenAI a créé, sur la base d'un GPT-3 amélioré, son *chatbot* ChatGPT. Mis à la disposition du public, en accès libre, le 30 novembre 2022, il comptait un million d'utilisateurs cinq jours plus tard. Et la concurrence arrive, avec notamment Bing Chat chez Microsoft et Bard chez Google. L'irruption de ChatGPT restera comme l'un des plus stupéfiants moments de l'histoire de l'IA. Pour la première fois, on peut converser de tout et de rien avec un logiciel qui produit des phrases syntaxiquement correctes, souvent sensées. ChatGPT bavarde, oui, mais il ne comprend rien à rien. Il peut proférer des énormités, comparer les mérites respectifs des œufs de poule et de vache. Il sait un peu comp- ◆◆◆

Des jumeaux numériques pour optimiser l'avenir

Qu'y a-t-il de commun entre une articulation d'épaule, la ville de Madrid et la Mar Menor, grande lagune du sud-est de l'Espagne? Toutes les trois possèdent un jumeau numérique, leur réplique virtuelle en 3D. Si, à l'origine, ces *digital twins* ont été utilisés en tant qu'outil d'aide à la conception dans l'aéronautique ou l'automobile, ils se multiplient aujourd'hui dans de nombreux secteurs d'activité, avec l'objectif de perfectionner les systèmes existants. L'explosion de l'IA n'est pas étrangère à ce phénomène. Dans la pratique, grâce à l'acquisition de milliers de données mises à jour en temps réel et optimisées grâce à des algorithmes, un modèle 3D est fabriqué. Puis des scénarios sont simulés et donnent des indications précises permettant, par des allers et retours entre le réel et le virtuel, de mieux appréhender des situations complexes ou les changements à y apporter. Ainsi, au CHU de Nice, le chirurgien Marc-Olivier Gauci optimise le placement d'une prothèse grâce à la projection en 3D de l'épaule de son patient. Dans un tout autre domaine, la ville de Madrid, grâce à son jumeau numérique, a pu réduire de 33 % le nombre de kilomètres parcourus par les livreurs de colis, source d'encombrements et de pollution, en optimisant le type et le nombre de véhicules ainsi que leur parcours. En Espagne toujours, le projet européen Smart Lagoon vise à créer un jumeau numérique de la Mar Menor pour prédire son évolution (qualité des eaux, trait de côte, etc.), en faisant varier les facteurs anthropiques: agriculture environnante, pêche, transports, etc. Grâce à l'IA, les *digital twins* prennent naturellement la suite des systèmes d'aide à la décision, ces programmes informatiques nés dans les années 2000, avec un réel échange humain-machine. À condition de les mettre à jour, car ces objets deviennent très vite obsolètes s'ils ne sont pas nourris de données en continu. Et de veiller au fin équilibre entre les dépenses énergétiques qu'ils génèrent et la décarbonation qu'ils permettent.

VALÉRIE HANDWEILER

BLUEPRINT

Grâce à un logiciel 3D de planification opératoire, le chirurgien peut positionner parfaitement la prothèse de son patient.

◆◆◆ ter, parce qu'il a lu mille fois que « deux et deux font quatre », mais est incapable de multiplier deux nombres de cinq chiffres. « *Les modèles de langage ne sont pas faits pour dire le vrai, résoudre des problèmes mathématiques ou commenter l'actualité,* insiste Benoît Sagot. *Une manière d'améliorer un outil comme ChatGPT consiste à le relier à des algorithmes spécialisés, par exemple dans la recherche sur internet ou le calcul.* »

Le défi : mettre au point une IA de confiance

À quoi ChatGPT et autres peuvent-ils servir? « *À bien des choses,* estime le chercheur. *À condition de ne pas se tromper sur leurs capacités. En particulier, ils synthétisent plutôt bien. Ils introduisent une nouvelle façon d'accéder à l'information. L'invention de l'écriture a permis d'externaliser notre mémoire en nous évitant de tout apprendre par cœur. Cela ne plaisait pas à Platon, soit dit en passant. Le moteur de recherche a amplifié ce phénomène en nous permettant d'accéder à toute l'information en ligne. Les héritiers de ChatGPT auront tout lu et répondront à nos questions sous la forme d'une synthèse.* »

Au cours de la décennie passée, l'apprentissage profond a démontré un potentiel inespéré. « *On ne sait pas vraiment pourquoi cela marche aussi bien* », admet Francis Bach. Mais il y a un bémol: les réseaux de neurones sont des boîtes noires, qui peuvent toujours réserver de mauvaises surprises. D'où ce mot d'ordre: il faut mettre au point une IA explicable, certifiable, équitable, responsable… bref, une IA de confiance. Pour ce faire, on parie notamment sur une hybridation des réseaux de neurones avec « l'autre IA », celle d'avant l'ère de l'apprentissage: l'IA symbolique ou cognitiviste, qui manipule des connaissances et raisonne. Mais cela n'empêchera pas les mésusages, et l'idée d'une régulation s'impose progressivement. Pionnière en la matière, l'Union européenne travaille depuis 2021 sur un AI Act, dont le vote final doit intervenir début 2024. Cette initiative semble faire tache d'huile…

PIERRE VANDEGINSTE

Melanie Mitchell, *Intelligence artificielle. Triomphes et déceptions*, Dunod, 2021

Yasmina Salmandjee, *ChatGPT pour les nuls*, First Interactive, 2023

Sébastien Konieczny et Henri Prade (dir.), *L'Intelligence artificielle. De quoi s'agit-il vraiment?* Cépaduès, 2020

Yann Le Cun, *Quand la machine apprend*, Odile Jacob, 2019

Le site Interstices d'Inria : https://sciav.fr/interstices

INNOVAXIOM

MATHIEU CORTEEL
Philosophe et historien des sciences, chercheur à l'université Harvard et à Sciences Po

« Face aux machines, l'humain subit une sorte de dévaluation »

Escamotant les technologies bien réelles qui le constituent, le numérique transforme la perception que nous avons de nous-mêmes et du monde.

Quel est l'impact majeur du virtuel, du numérique, sur nos sociétés ?
Selon moi, il est avant tout culturel, en lien avec notre représentation du monde. Le terme de virtuel rappelle que notre culture est traversée par un paradoxe : une sorte d'hybridité entre matériel et immatériel. Les technologies du numérique, et notamment l'intelligence artificielle, sont aujourd'hui tellement inséparables de nos rapports sociaux et de nos modes de vie qu'elles s'effacent derrière leurs fonctions – écriture, calcul, image, communication... D'où le sentiment qu'elles sont dématérialisées. Dans les usines, les bureaux, les hôpitaux ou les supermarchés, on ne voit plus d'elles que le résultat. On en oublie la mécanique et le programme, et que derrière ce gain de rapidité ou d'efficacité se cachent des data centers ultra-énergivores et une impitoyable machinerie économique. Cette amnésie induit l'impression que tout cela va de soi. La perception du monde tout entière en est transformée : on flotte dans l'immatériel.

Comment se fait-il que nous trouvions normal que des objets répondent à nos questions ?
Le fait que le mécanisme de fonctionnement du numérique soit à ce point dissimulé par des interfaces crée l'illusion chez l'utilisateur qu'il y a derrière tout cela bien plus que de la simple combinaison de symboles, du traitement de données ou de la hiérarchisation de signaux. Engagés dans une interaction continue avec ces machines, nous éprouvons le sentiment qu'elles formulent une pensée non humaine. Comme l'a théorisé le philosophe Gilbert Simondon dès les années 1950, plus les techniques se concrétisent en s'intégrant à notre quotidien, plus elles ressemblent à des objets naturels, plus nous trouvons normal d'échanger avec elles.

Ces dernières années, ne s'est-il pas ouvert à cet égard un gouffre de craintes ?
Sans aucun doute, car nous sommes face à quelque chose de radicalement nouveau : des technologies puissantes au développement rapide qui engendrent à la fois fascination et angoisse. Nous sommes confrontés à une remise en question de ce qu'est l'humain, une redéfinition de la nature de la pensée. N'étant plus les seuls à « penser », nous perdons le statut anthropologique qui nous hissait sur un piédestal. L'humain subit une sorte de dévaluation : on voudrait aujourd'hui qu'il soit aussi bon que les machines. Or, comme le disait le mathématicien britannique Alain Turing, si vous faites courir un humain contre un avion de chasse, il perd.

Nous entrerions donc dans une phase de compétition avec elles ?
Oui, une mise en compétition injustifiée, qui engendre la peur de se faire déposséder de son travail, de ses compétences, de ses capacités cognitives… d'à peu près tout ce qui passait pour faire notre singularité. Le philosophe Günther Anders appelle cela la honte prométhéenne : celle de ne pas avoir été nous-mêmes construits et optimisés pour être plus performants que ces machines que nous manufacturons nous-mêmes et qui accomplissent mieux que nous de nombreuses tâches. Nous sommes fascinés par leurs capacités à établir des corrélations à partir de calculs de probabilités. Et nous avons l'impression que nous agissons de la même façon. Mais ce n'est pas le cas : ce que ne feront jamais les machines, c'est avoir du génie, créer quelque chose de complètement nouveau. L'humain seul est capable de relier des contenus au réel. Donner de la signification au monde, c'est ce qui fait notre humanité.

PROPOS RECUEILLIS PAR ANDREINA DE BEI

> THÉRAPEUTIQUE

L'ARN, un incroyable couteau suisse médical

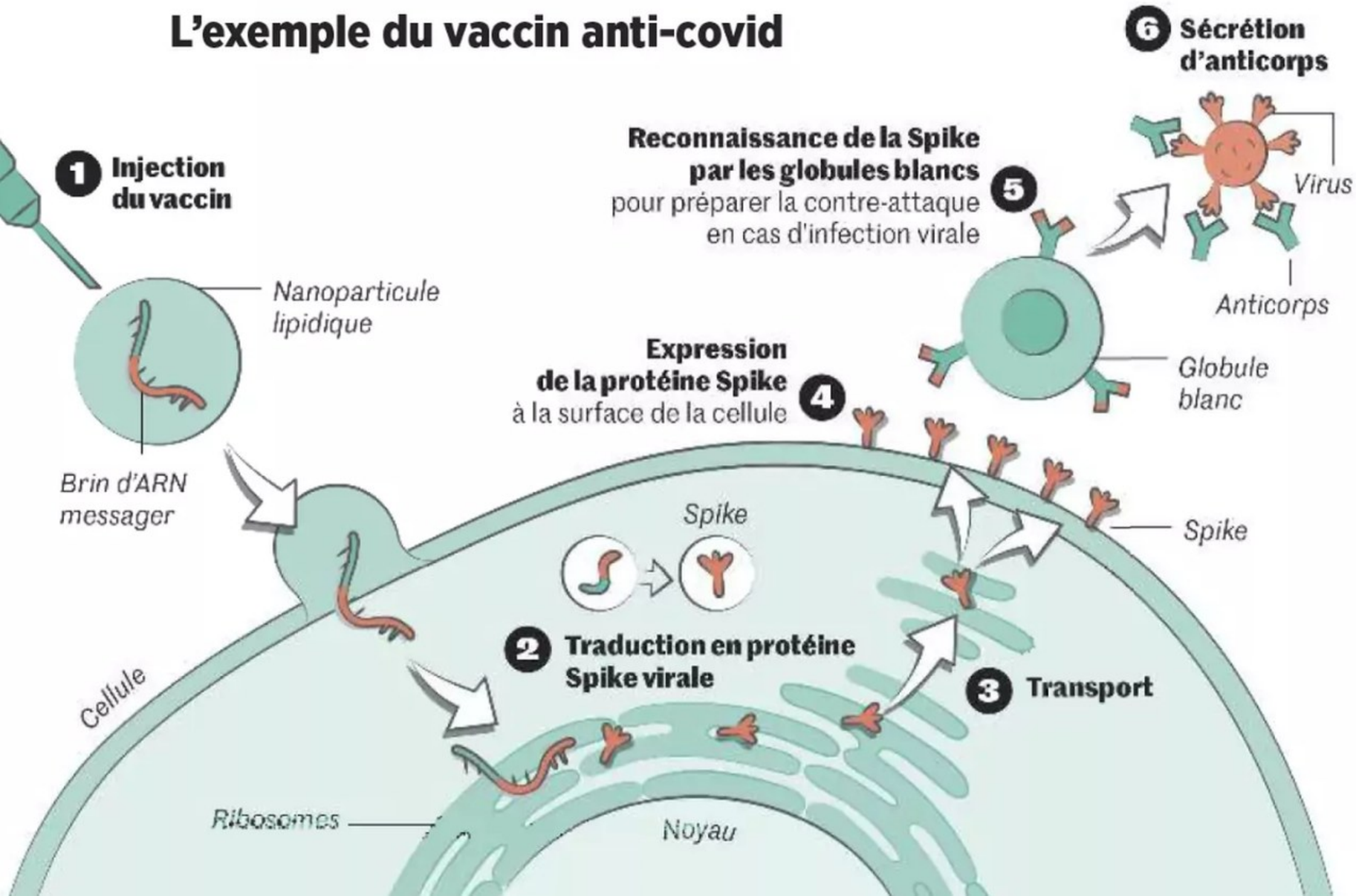
Le monde entier connaît désormais les trois lettres désignant l'acide ribonucléique. Comment cette molécule révolutionne-t-elle le traitement de pathologies comme certains cancers ou maladies génétiques héréditaires ? Explications.

Depuis sa mise au point au XVIIIe siècle, la vaccination a sauvé des dizaines de millions de vies. La méthode la plus classique consiste aujourd'hui à injecter dans l'organisme des virus affaiblis ou inactivés, ou des composants viraux partiels, afin d'entraîner le système immunitaire à les reconnaître et à les combattre. Or, synthétiser ces fragments de virus en masse nécessite de cultiver des cellules à très grande échelle, processus long et coûteux. Dans les années 1980, une solution semble s'esquisser. Elle s'appuie sur une molécule capitale de l'organisme : l'ARN messager (ARNm), une copie de l'ADN qui, contrairement à celui-ci, est située hors du noyau de la cellule et sert de plan pour la synthèse des protéines avant de s'autodétruire. Lorsqu'il devient possible de produire en laboratoire cet ARNm sans recourir à des cultures cellulaires, une idée fleurit chez les scientifiques. Et si l'on pouvait développer rapidement des vaccins grâce à ce procédé ?

La méthode : injecter un ARNm fabriqué en laboratoire dans les cellules de l'organisme, afin qu'elles produisent une protéine du virus que l'on veut combattre. Cette protéine, ou antigène, migrera vers la surface de la cellule où elle sera reconnue comme étrangère par le système immunitaire, qui détruira la cellule et apprendra à reconnaître l'agent pathogène en vue d'une future infection. Seule ombre au tableau, l'ARNm est instable en raison de sa structure chimique, et l'injection de sa version synthétisée engendre une réaction inflammatoire… L'enthousiasme est tué dans l'œuf.

Deux irréductibles chercheurs, collaborateurs à l'université de Pennsylvanie (États-Unis), ne baissent

L'exemple du vaccin anti-covid



Le vaccin consiste à injecter dans l'organisme une séquence ARN inoffensive du virus SARS-Cov-2, celle qui est responsable de la production de la protéine Spike à la surface du virus. Cette séquence est encapsulée dans une nanoparticule lipidique qui la conduit à destination (1). À l'intérieur de la cellule, les ribosomes traduisent la séquence et fabriquent la protéine (2). Celle-ci migre à la surface de la cellule (3) où elle est présentée aux cellules immunitaires (4), qui apprennent à la reconnaître comme un élément étranger (5) et sécrètent des anticorps (6). Ces derniers seront capables de neutraliser le virus en cas d'infection.

SOURCE: THE NOBEL COMMITTEE FOR PHYSIOLOGY OF MEDECINE, MATTIAS KARLEN. INFOGRAPHIE: LE MONDE

Le prix Nobel de physiologie ou médecine 2023 a récompensé Katalin Kariko et Drew Weissman pour leurs travaux sur l'ARNm.

PENN UNIVERSITY

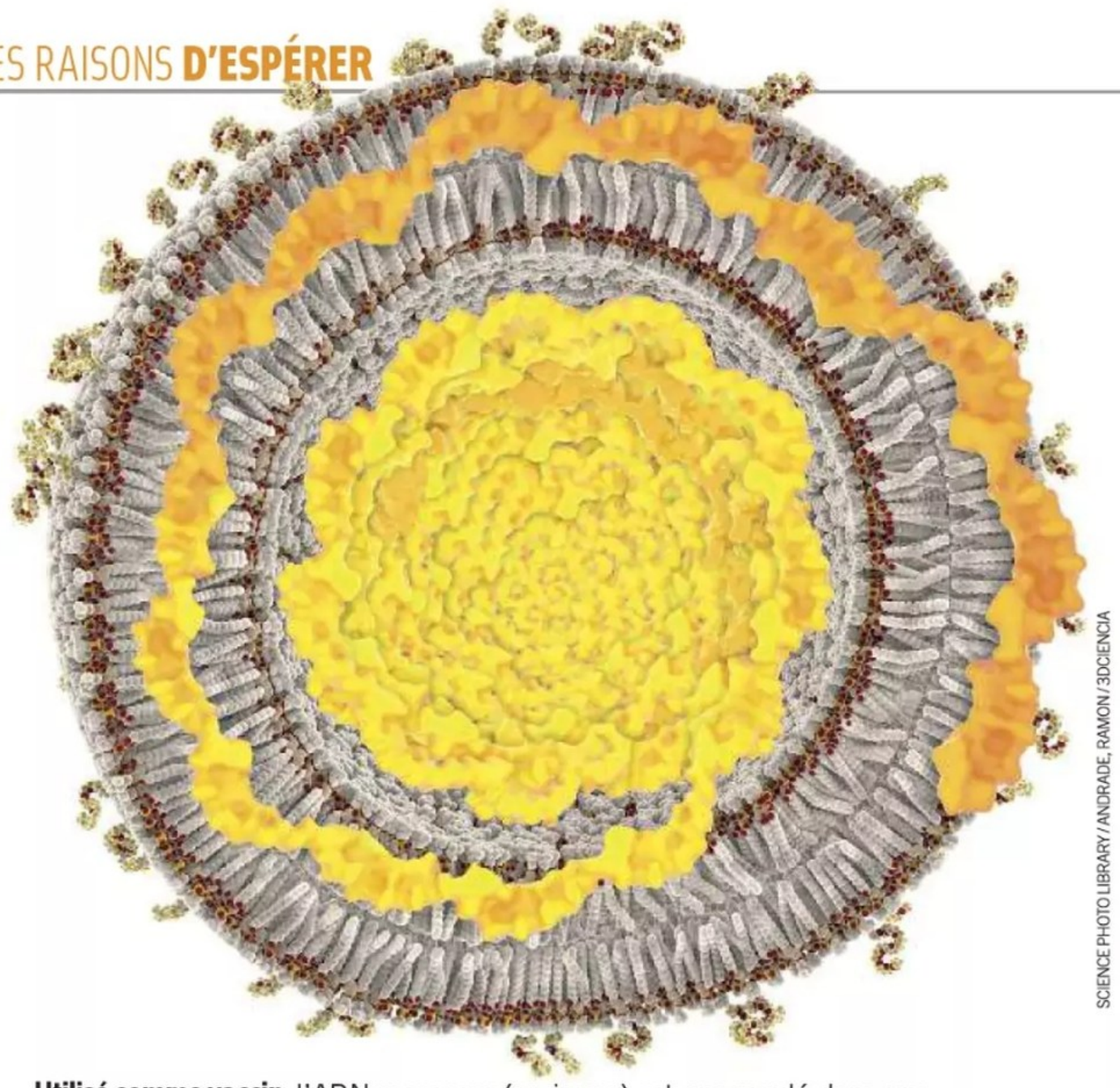
cependant pas les bras. Katalin Karikó, biochimiste hongro-américaine, et Drew Weissman, immunologue américain, essaient de déterminer pourquoi, contrairement à l'ARNm produit par l'organisme, son équivalent élaboré en laboratoire est détecté comme un corps étranger par les sentinelles du système immunitaire, les cellules dendritiques. Chez les mammifères, l'ARNm subit fréquemment des modifications chimiques – une sorte de phénomène de maturation –, ce qui n'est pas le cas de l'ARN produit *in vitro*. Soupçonnant que cette maturation est en cause, les deux chercheurs présentent diverses versions d'ARNm pourvues de modifications chimiques à des cellules dendritiques. Résultat: la réponse inflammatoire est alors quasiment inexistante. La publication de ce travail, en 2005, relance l'engouement pour un usage thérapeutique de l'ARNm et ouvre la voie au développement de vaccins utilisant cette molécule. Quinze ans plus tard, de tels vaccins, dont l'efficacité atteint 95 %, seront produits en un temps record contre le covid-19. Et en octobre 2023, Katalin Karikó et Drew Weissman seront récompensés par le prix Nobel de physiologie ou médecine pour avoir permis cet exploit.

Mais l'ARN a plus d'un tour dans son sac. Cette reconnaissance fait écho à l'essor qu'il connaît en tant qu'outil thérapeutique face à diverses pathologies. L'un des enjeux les plus récents réside dans la lutte contre les maladies génétiques héréditaires, pour beaucoup jusqu'à présent sans traitement. Ainsi, en juillet 2023, Laure Breda et ses collègues du Children's Hospital de Philadelphie (États-Unis) s'attaquent à certains déficits immunitaires et aux pathologies de l'hémoglobine, comme la drépanocytose. Leur approche: se servir de l'ARNm comme d'un médicament correcteur du défaut génétique à l'origine de la maladie. Pour ce faire, ils incorporent des modifications génétiques dans un ARNm stabilisé qu'ils encapsulent dans des nanoparticules lipidiques, ces dernières servant de vecteur pour délivrer la molécule dans les cellules où réside la déficience. Si ces travaux sont pour l'heure effectués sur des souris, leur succès semble prometteur pour des essais cliniques futurs. Mais ce n'est pas tout! Les chercheurs utilisent déjà l'ARN thérapeutique pour traiter un large éventail de maladies génétiques. Il peut être administré régulièrement pour restaurer l'activité d'une protéine déficiente, mais aussi pour soulager les symptômes de ces pathologies.

LES CHERCHEURS UTILISENT DÉJÀ L'ARN THÉRAPEUTIQUE POUR TRAITER UN LARGE ÉVENTAIL DE MALADIES GÉNÉTIQUES. IL PEUT ÊTRE ADMINISTRÉ RÉGULIÈREMENT POUR RESTAURER L'ACTIVITÉ D'UNE PROTÉINE DÉFICIENTE

Les ARN interférents pour détruire les protéines

Cet arsenal ne se limite pas aux ARN messagers. Car il existe plusieurs types d'ARN, qui diffèrent par leur organisation spatiale, leur séquence – l'ordre dans lequel les bases nucléiques qui les composent (A, C, G, T) s'enchaînent le long du brin –, et, de ce fait, leur rôle. Aux ARN messagers s'ajoutent ainsi les ARN interférents (ARNi), dont la découverte par Andrew Fire, de l'université Stanford, en Californie (États-Unis), et Craig Mello, de l'université du Massachussetts (États-Unis), a été récompensée en 2006 par le prix Nobel de médecine. Les ARNi ne servent pas de plan de synthèse pour les protéines, mais sont impliqués dans la régulation de leur production. Ils se replient sur eux-mêmes et se fixent sur certaines régions de l'ARNm, ce qui permet de bloquer la synthèse de la protéine correspondante et de détruire l'ARNm. En modulant l'activité de ces petites molécules, il devient donc possible de contrôler le niveau de production d'une protéine dans l'organisme. Des médicaments à base de ces ◆◆◆



SCIENCE PHOTO LIBRARY / ANDRADE, RAMON / 3DCIENCIA

Utilisé comme vaccin, l'ARN messager (en jaune) est encapsulé dans une nanoparticule lipidique qui le transporte à l'intérieur des cellules.

◆◆◆ ARNi ont déjà vu le jour. Le premier d'entre eux, le Patisiran, a été approuvé aux États-Unis en 2018 pour traiter l'amylose hépatique héréditaire. Cette maladie se caractérisant par l'accumulation d'une protéine dans les nerfs périphériques et le cœur, le Patisiran se fixe sur l'ARNm responsable de la synthèse de cette protéine et entraîne sa destruction.

Enfin, les chercheurs travaillent avec certaines séquences d'ARN très courtes appelées « oligonucléotides anti-sens », capables de se lier spécifiquement à un ARNm. La séquence de ce dernier est parsemée de signaux chimiques qui indiquent quelles modifications chimiques il doit subir pour maturer. Lorsque ces signaux sont altérés, la maturation ne s'exécute pas correctement. En masquant ces mutations ou, au contraire, en amplifiant les signaux de maturation, les oligonucléotides anti-sens permettent de lutter contre des maladies comme la myopathie de Duchenne, qui se manifeste par une dégénérescence progressive de tous les muscles du corps. Plus largement, l'usage d'oligonucléotides permet de modifier la protéine synthétisée par l'ARNm. Le premier médicament basé sur cette technique, le Fomivirsen, a été mis sur le marché européen en 1999 et traite une infection virale de la rétine en se liant à l'un des ARNm de l'agent pathogène.

Des vaccins anti-cancer du pancréas ou du sein

Les cancers constituent aussi une cible de choix pour les ARN thérapeutiques. En oncologie, les oligonucléotides anti-sens sont considérés comme de bons candidats pour museler l'expression d'ARNm synthétisant des protéines impliquées dans la formation des tumeurs. Parallèlement, les chercheurs travaillent au développement de vaccins à ARNm destinés à stimuler l'immunité contre les cancers. Comme les cellules tumorales nous sont propres – c'est-à-dire qu'elles sont reconnues comme partie intégrante de notre organisme par nos défenses naturelles –, elles ne produisent pas d'antigènes, les molécules permettant au système immunitaire de les reconnaître comme des intruses et de les détruire. Elles peuvent même parfois réprimer nos défenses naturelles.

En 1995, une équipe de l'université de l'Alabama à Birmingham (États-Unis) injectait pour la première fois de l'ARNm codant pour une protéine antigénique dans des souris, engendrant une réponse immunitaire dirigée contre les cellules tumorales. Ces résultats encourageants ont conduit dans les années 2000 à une multitude d'essais cliniques de vaccins à ARNm contre les cancers de la prostate, du poumon, du rein, du pancréas, de l'ovaire, du colon et de la peau. Et les résultats plus que positifs du vaccin contre le Covid-19 incitent de grandes entreprises de biotechnologie, comme BioNTech, à investir dans cette voie.

Ainsi, l'ARN fait figure de véritable couteau suisse permettant de dépasser les approches thérapeutiques classiques, qui consistent à employer des substances interagissant directement avec leur cible – protéine ou agent pathogène. Une situation parfois difficile, voire dangereuse car les substances en cause peuvent interagir avec d'autres molécules que celles ciblées, entraînant des effets secondaires délétères. L'ARNm, lui, permet de faire synthétiser n'importe quelle protéine à nos cellules ; l'ARNi peut cibler des ARNm de manière spécifique, annulant tout risque d'effet indésirable, et moduler leur activité. En outre, la nature fragile de l'ARN fait de lui un outil transitoire, ne modifiant pas le génome du patient traité.

À l'Inserm, plusieurs équipes marchent dans les pas des deux Nobel. Celle de Philippe Barthélémy, au laboratoire Arna, travaille sur les modifications permettant de stabiliser l'ARN. Tandis que celle de Bruno Pitard, à Nantes, s'attelle à mettre au point des vecteurs efficaces permettant de livrer ces ARN dans les cellules cibles. L'avenir de la biologie médicale s'écrira peut-être en trois lettres…

WILLIAM ROWE-PIRRA

Fabrice Delaye, *La Révolution de l'ARN messager*, Odile Jacob, 2021

Reportage « Vaccin ARN messager : du complotisme au prix Nobel de médecine », Olivier Boucreux, Arte, 2023, sciav.fr/vaccinARNm

OPTOGÉNÉTIQUE

Un gène d'algue pour recouvrer la vue

Modifier génétiquement des neurones pour redonner aux organes leur fonction d'origine. Après vingt ans d'efforts, les scientifiques viennent de réussir cette prouesse grâce à une technologie en passe non seulement de révolutionner l'ophtalmologie, mais aussi de traiter des pathologies cardiaques et ORL: l'optogénétique, une technique associant génétique et ondes lumineuses. C'est en 2002 que le biophysicien allemand Ernst Bamberg identifie la channelrhodopsine (ou rhodopsine canal), une protéine d'algue capable, après avoir été exposée à la lumière, de produire un courant électrique dans une cellule. Pour les chercheurs de l'Institut de la vision, en France, cette protéine ouvre des perspectives dans le traitement de patients aveugles souffrant de rétinite pigmentaire, une maladie génétique qui détruit les photorécepteurs. Inséré à l'aide d'un vecteur viral dans certains neurones de la rétine, comme les cellules ganglionnaires, le gène de la channelrhodopsine rend en effet celles-ci capables de se substituer aux photorécepteurs perdus. *« Les traitements utilisaient jusque-là des implants dans la rétine, ne permettant qu'une acuité visuelle limitée,* remarque Serge Picaud, directeur de l'Institut. *L'optogénétique est une interface cerveau-machine sans contact ! »* En 2021, l'Institut de la vision a annoncé qu'un premier patient, aidé de lunettes amplifiant le signal lumineux, a ainsi pu percevoir des objets. *« Nous craignions que le système immunitaire du patient reconnaisse ces cellules contenant un matériel génétique d'algue comme des corps étrangers et s'en débarrasse. Cela n'a pas été le cas »,* confie le chercheur. Actuellement, les scientifiques tentent d'améliorer les capacités visuelles des patients. *« Nous voudrions augmenter l'expression génétique de la channelrhodopsine pour que davantage de cellules répondent, et à des intensités lumineuses plus faibles »,* précise Serge Picaud. D'autres recherches étendent cette technologie à des patients ayant perdu la connexion œil-cerveau. L'objectif est de modifier les neurones grâce à des protéines sensibles cette fois aux ultrasons, qui pénètrent davantage dans les tissus que les ondes lumineuses, dans l'espoir de générer des images ultrasonores dans le cerveau. Après la révolution de l'optogénétique, les prochaines décennies pourraient donc voir se développer sa version acoustique: la sonogénétique.

RIVA BRINET-SPIESSER

Des lunettes amplifiant le signal lumineux complètent la thérapie génique. Ici, un prototype de la start-up française Gensight.

MARC CHAUMEIL/DIVERGENCE

ERIC PIERMONT / AFP

Thomas Ybert, cofondateur et PDG de DNA Script, souhaite « démocratiser » l'accès à l'ADN.

BIOTECHNOLOGIE

DE L'ADN IMPRIMÉ À LA DEMANDE

On dirait une grosse imprimante. Et en effet, elle imprime… des petits segments d'ADN, des oligonucléotides. Dans ses cartouches : des réactifs portant les quatre nucléotides du vivant (A, C, T, G), des enzymes… Premier du genre, ce robot enfile des « perles », une à une, en fonction de la commande : à l'aide d'un enzyme, il allonge – d'un nucléotide de la variété voulue à la fois – des petits brins d'ADN. Cela, en parallèle dans les 96 « puits » d'une plaque au standard des automates de biologie. *« Pour produire 96 brins différents de 20 à 30 nucléotides, il faut environ six heures »,* calcule Thomas Ybert, cofondateur et PDG de la société DNA Script. En simplifiant à l'extrême la production de brins et donc en diminuant son coût, l'imprimante à ADN facilitera la recherche sur l'origine de la vie, rendra plus efficaces des thérapies cellulaires, accélérera la mise au point de vaccins et médicaments et leur production par une bactérie au génome modifié. Mais on peut craindre des usages malveillants. Un rapport publié en mai par l'ONG américaine NTI estime que d'ici cinq à dix ans, les imprimantes permettront la synthèse de brins de 10 000 nucléotides. Or, bien des virus ont un génome plus court…

PIERRE VANDEGINSTE

Les 500 millions de neurones du tube digestif interagissent en permanence avec le système nerveux central.

SPL/SUCRÉ SALÉ

NEUROLOGIE

Microbiote-intestin-cerveau : l'intime connexion

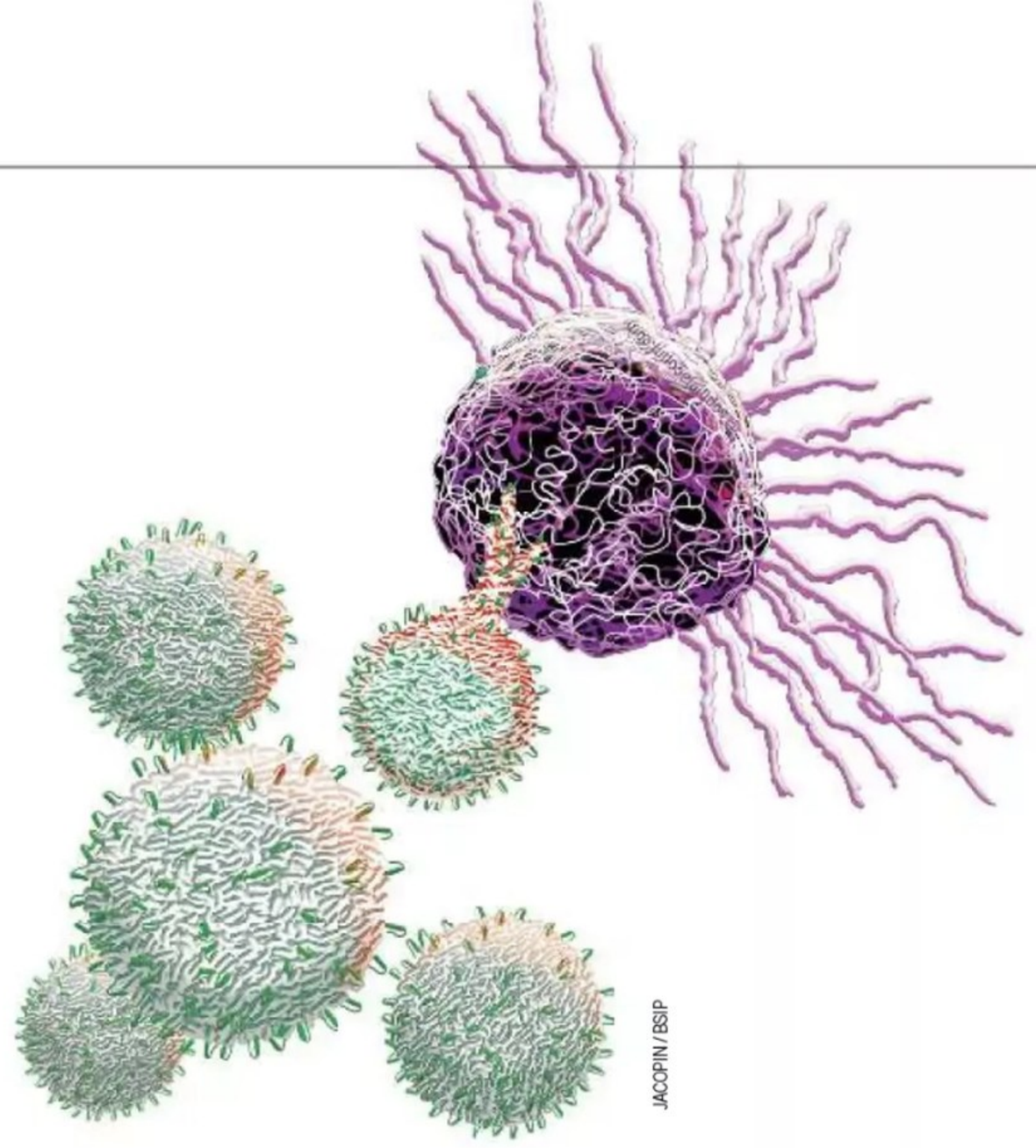
« *Le système nerveux entérique* [relatif aux intestins, ndlr] *n'a longtemps suscité aucune curiosité chez les scientifiques. Mais la découverte de ses similitudes avec le cerveau a conduit à le surnommer le "deuxième cerveau" dès 1995* », se souvient Pascal Derkinderen, chercheur à l'Institut du thorax et du système nerveux à Nantes, spécialiste français du lien entre cerveau, intestins et maladies neurodégénératives. « *Très vite, l'intérêt qu'on lui portait a été renforcé par son lien avec des pathologies : en 1997, on s'est aperçu que les personnes atteintes de la maladie de Parkinson ont toutes des lésions dans le tube digestif* », raconte le neurologue. Émerge alors l'hypothèse que certaines maladies neurodégénératives atteindraient d'abord le système nerveux entérique avant d'être transmises, grâce au nerf vague qui les relie, au système nerveux central. Car les deux sont en interaction bidirectionnelle en permanence. On parle d'un axe intestin-cerveau. Un troisième acteur, le microbiote intestinal, c'est-à-dire l'ensemble des bactéries, virus et champignons non pathogènes qui peuplent le tube digestif, s'est imposé depuis 2006 et les débuts du séquençage génétique de ces micro-organismes. « *L'axe microbiote-intestin-cerveau s'est imposé. Le microbiote peut agir sur le cerveau en libérant dans la circulation sanguine des composés comme la sérotonine, ayant un impact sur le cerveau, et donc sur l'humeur et les maladies psychiatriques* », indique le chercheur. Au cours des trois dernières années, les scientifiques ont multiplié les expériences de transfert de microbiote de souris stressées ou dépressives à des souris saines, lesquelles finissent par avoir elles aussi les manifestations psychologiques des donneuses. L'hypothèse : certains troubles neurologiques ou même psychiatriques pourraient être liés à une dysbiose (rupture de l'équilibre) du microbiote intestinal. « *Pour le moment, aucun marqueur prouvant une différence entre le microbiote des patients humains déprimés et non déprimés n'a été retrouvé dans leurs selles* », précise Pascal Derkinderen. En septembre 2022, l'Inrae a lancé le projet French Gut qui vise à recueillir les selles de 100 000 volontaires pour mettre en évidence prochainement de telles différences selon les pathologies. Avec l'espoir, à l'avenir, de jouer sur l'humeur ou de soigner les troubles neuropsychiatriques en modifiant l'alimentation, dont on sait qu'elle agit sur la composition du microbiote.

MARINE CYGLER

CANCER

Les attaques toujours plus ciblées de l'immunothérapie

Alors qu'elles devraient être attaquées et éliminées par le système immunitaire, comme toute cellule anormale, les cellules cancéreuses sont capables de faire en sorte qu'il les tolère, ce qui leur permet de proliférer et de former des tumeurs. Stimuler le système immunitaire pour lui redonner son rôle de défenseur de l'organisme: tel est l'objectif de l'immunothérapie, dont l'essor remonte à 2010, et dont l'action a déjà permis d'augmenter de façon spectaculaire la survie de malades atteints de mélanome ou de cancer du poumon à des stades avancés. Cette stratégie thérapeutique est expérimentée pour des types de cancers de plus en plus nombreux. *« Et à des stades plus précoces, avant ou juste après la chirurgie »,* indique Aurélien Marabelle, qui dirige le programme de recherche sur l'immunothérapie au centre anti-cancer Gustave-Roussy, à Villejuif (Val-de-Marne). Il considère, enthousiaste, qu'*« on est en train de passer à l'immunothérapie 2.0 »*. Autrement dit, dès lors qu'on sait que *« l'approche est pertinente pour traiter le cancer »*, on est entré dans une deuxième phase. *« Le système immunitaire rassemble des cellules très différentes. On a donc la possibilité d'avoir un grand nombre de cibles, mais aussi diverses façons de diriger vers elles les médicaments, ce qui est inédit dans l'histoire de la cancérologie »,* poursuit-il. Aujourd'hui, à l'hôpital, l'immunothérapie repose surtout sur l'usage d'anticorps monoclonaux, qui ciblent une protéine de la membrane des cellules cancéreuses. Mais demain, le spécialiste décrit des anticorps bispécifiques qui rapprochent physiquement la cellule immunitaire de la cellule cancéreuse, ou encore des thérapies géniques sous forme de cocktail d'ARN, qui forceront la cellule cancéreuse à sécréter des molécules la rendant plus susceptible d'activer le système immunitaire. Sans oublier les vaccins thérapeutiques qui font d'ores et déjà l'objet d'essais cliniques, notamment pour le cancer du pancréas au pronostic sombre.



JACOPIN / BSIP

Une stratégie de l'immunothérapie consiste à modifier génétiquement des cellules immunitaires. Ici, des lymphocytes T (à gauche) sont modifiés avec un gène CAR (en vert) afin qu'ils reconnaissent les cellules cancéreuses (à droite).

M. C.

TRANSPLANTATIONS

LE COCHON, FUTURE USINE À GREFFONS

Faire produire par des animaux des organes destinés à être transplantés sur des humains ? Ce fantasme ancien est devenu réalité en septembre 2021, lorsqu'une équipe de l'université de New York (États-Unis) a implanté avec succès un rein de cochon chez un patient en état de mort cérébrale. Un exploit qui a pourtant été surpassé moins de quatre mois plus tard avec l'implantation d'un cœur de porc chez une personne qui ne pouvait pas recevoir la greffe d'un organe humain, à cause de sa faible probabilité de survie. Cette xénogreffe a été réalisée par des chirurgiens de l'université du Maryland (États-Unis), et a permis au patient de vivre deux mois de plus. Pour éviter que le corps humain ne rejette immédiatement ces organes provenant d'une autre espèce, les chercheurs ont modifié génétiquement les animaux donneurs. Mais des risques de rejet ultérieur persistent, les obligeant à envisager davantage de modifications afin que les bénéficiaires puissent les garder aussi longtemps qu'un greffon humain. Des essais cliniques sur ces organes provenant de cochons OGM devraient commencer en 2024. Parallèlement, d'autres équipes tentent de supprimer tout risque de rejet en suivant une autre piste: celle d'organes humains (composés principalement de cellules humaines) cultivés dans des cochons. Ce n'est sans doute que le début d'une révolution qui pourrait résoudre la pénurie mondiale d'organes, et apporter de l'espoir à des milliers de patients en attente d'une transplantation.

UNIVERSITY OF MARYLAND SCHOOL OF MEDICINE / AFP

Maryland (États-Unis), janvier 2022. Première greffe d'un cœur de porc chez un humain.

NICOLAS GUTIERREZ C.

> GÉNÉTIQUE

CRISPR-CAS9 : COUPURE À VIF DANS LE VIVANT

En une décennie, l'outil capable de couper l'ADN s'est répandu dans les labos du monde entier. Rapide, peu chère et diablement efficace pour inactiver ou remplacer un gène, cette technologie ouvre des perspectives infinies… et suscite son lot de controverses.

Sous la plume des journalistes comme dans la bouche des biologistes, un adjectif revient immanquablement lorsqu'on évoque la jeune technologie Crispr-Cas9 : « révolutionnaire ». Il faut dire que depuis sa mise au point en 2012, cet outil a permis d'innombrables prouesses, en recherche fondamentale comme en agronomie ou en médecine, en passant par la très décriée naissance des premiers « bébés OGM ».

Si l'outil n'a qu'une dizaine d'années, ses origines remontent à 1987, lorsqu'une équipe japonaise découvre de courtes séquences d'ADN répétées dans le génome d'une bactérie. Les décennies qui suivront seront le théâtre d'une minutieuse enquête autour du rôle de ces séquences, par la suite appelées Crispr. Première surprise : chez de nombreuses bactéries, elles entourent des portions d'ADN issues de virus. On découvre également qu'un type de protéine capable de couper l'ADN leur est généralement associé, protéine qui prendra le nom de Cas, pour « Crispr Associated Protein ». Au fil des années, le système Crispr-Cas se dévoile comme un ingénieux mécanisme immunitaire bactérien : lorsqu'une bactérie est infectée par un virus, elle intègre des séquences d'ADN de ce dernier. Lors d'une nouvelle infection par le même virus, le système reconnaît son ADN et y envoie la protéine Cas qui coupe la séquence virale, stoppant l'agresseur.

P.STEFFEN/DPA/AP/SIPA

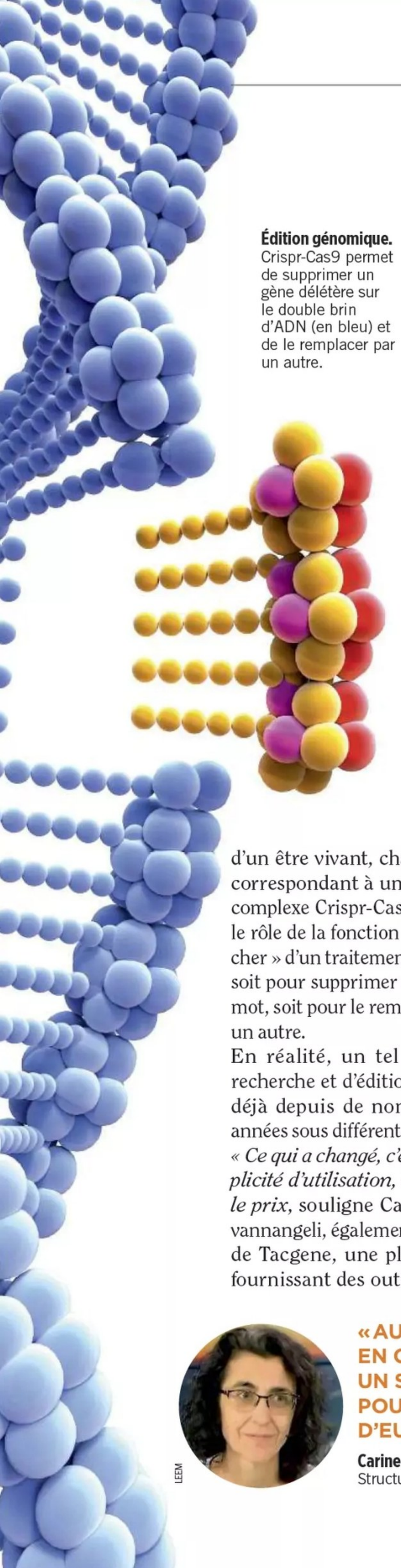
Emmanuelle Charpentier, co-lauréate, avec l'Américaine Jennifer Doudna, du prix Nobel de chimie en 2020 pour l'invention de la technique des ciseaux génétiques.

L'outil se charge même de recoller les morceaux

La dernière brique de l'enquête prendra la forme d'une publication parue dans la revue *Science* en 2012, qui offrira à ses deux auteures principales, la Française Emmanuelle Charpentier et l'Américaine Jennifer Doudna, le prix Nobel de chimie en 2020. *« Cette étude a montré que le système utilisant la protéine Cas9, plus simple que ceux utilisant d'autres protéines Cas, pouvait être détourné pour couper* in vitro *n'importe quelle séquence ADN,* résume Carine Giovannangeli, directrice de recherche dans l'unité Structure et instabilité des génomes (CNRS/Inserm/MNHN). *Tout est ensuite allé très vite : en quelques mois, on a vu fleurir plusieurs publications montrant comment le système Crispr-Cas9 pouvait permettre de modifier le génome chez la souris, le poisson ou dans des cellules humaines. »*

Le fonctionnement s'avère des plus simples : au sein d'une cellule, on indique au complexe Crispr-Cas9 le gène que l'on souhaite couper via une séquence complémentaire appelée « ARN guide », qui emmène la protéine Cas9 à destination. Une fois l'ADN coupé par cette dernière, la machinerie cellulaire se charge de recoller les deux morceaux. Mieux encore, il est possible d'injecter dans la cellule une nouvelle séquence ADN qui remplacera le gène ciblé. Imaginez un gigantesque livre numérique représentant le génome

SPL/SUCRÉ SALÉ



Édition génomique. Crispr-Cas9 permet de supprimer un gène délétère sur le double brin d'ADN (en bleu) et de le remplacer par un autre.

d'un être vivant, chaque mot correspondant à un gène. Le complexe Crispr-Cas9 tient ici le rôle de la fonction « Rechercher » d'un traitement de texte, soit pour supprimer ensuite le mot, soit pour le remplacer par un autre.

En réalité, un tel outil de recherche et d'édition existait déjà depuis de nombreuses années sous différentes formes. *« Ce qui a changé, c'est la simplicité d'utilisation, ainsi que le prix,* souligne Carine Giovannangeli, également à la tête de Tacgene, une plateforme fournissant des outils clef en main d'édition du génome. *Avant, il fallait concevoir de A à Z une protéine dédiée pour couper une séquence, ce qui prenait des mois et coûtait des dizaines de milliers de dollars. Aujourd'hui, on peut obtenir en quelques jours seulement un système Crispr prêt à l'emploi pour quelques centaines d'euros. »*

Vaches sans cornes afin de limiter les blessures

Un outil si facile d'accès a logiquement révolutionné la recherche fondamentale. *« Tous les labos qui travaillent sur le gène l'utilisent aujourd'hui,* reprend la biologiste. *Il peut servir à inactiver un gène afin de comprendre son rôle, ou encore lui accoler une protéine fluorescente pour le suivre dans une cellule. »* L'industrie s'est également saisie de cet outil pour modifier le génome d'espèces animales et végétales, qu'il s'agisse de développer une variété de riz plus productive ou des vaches sans cornes pour limiter les blessures.

Mais les applications les plus marquantes sont venues de la thérapie génique. En 2018, une équipe texane a réussi à rendre leur mobilité à des chiens paralysés par une myopathie, la maladie de Duchenne. Autre exemple : un traitement contre la drépanocytose, maladie génétique affectant les globules rouges, est en attente d'une autorisation de mise sur le marché. Son principe : réinjecter aux malades des cellules produisant des globules rouges génétiquement modifiés par Crispr-Cas9. Une soixantaine d'essais cliniques utilisant ces ciseaux moléculaires sont actuellement en cours à travers le monde.

« Ces nouveaux outils de thérapie génique, dont chaque traitement peut coûter plusieurs millions de dollars, posent une question d'accessibilité. Ils pourraient faire peser un poids difficilement soutenable sur nos systèmes de santé, et rester hors de portée de la plupart des pays du Sud, commente le président du comité d'éthique de l'Inserm, Hervé Chneiweiss. *Par ailleurs, la ligne rouge avec Crispr-Cas9 concerne les modifications héritables, transmissibles à la descendance. Tout simplement car les mécanismes de réparation de l'ADN après une coupure restent peu précis et mal connus. Il y a trop d'incertitudes pour risquer des modifications irrémédiables du génome. »*

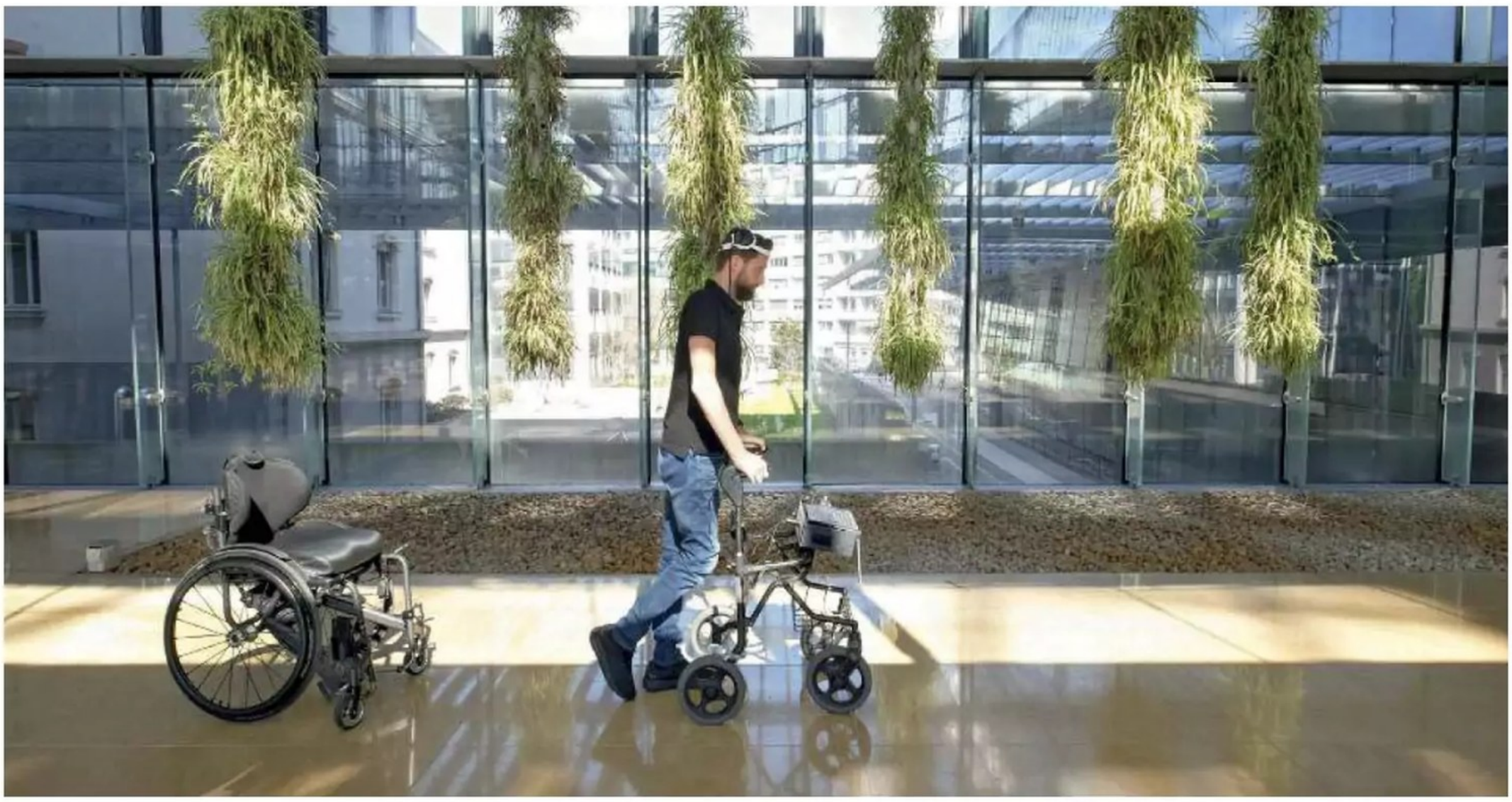
Une ligne rouge pourtant franchie en 2018 avec la naissance de jumelles chinoises dont un gène avait préalablement été modifié par Crispr-Cas9 pour leur conférer une résistance au VIH. *« Une fraude et un crime à tous les niveaux,* dénonce sévèrement Hervé Chneiweiss, à l'unisson de l'ensemble de la communauté scientifique. *En réalité, ces questions éthiques sont loin d'être nouvelles, mais restaient jusqu'ici très théoriques. Elles se présentent désormais sous un jour nouveau dès lors que Crispr-Cas9 ouvre la porte à des applications concrètes de modifications du génome. »*

YANN CHAVANCE

LEEM

« AUJOURD'HUI, ON PEUT OBTENIR EN QUELQUES JOURS SEULEMENT UN SYSTÈME CRISPR PRÊT À L'EMPLOI POUR QUELQUES CENTAINES D'EUROS »

Carine Giovannangeli, directrice de recherches à l'unité Structure et instabilité des génomes



EPFL / JIMMY RAMER

En mai 2023, une personne paraplégique a pu remarcher naturellement grâce à une interface sans fil entre cerveau et moelle épinière.

NEUROSCIENCES

Des implants cérébraux pour réparer les humains

Le cerveau n'est plus une boîte noire. Non seulement les scientifiques sont désormais capables de le « lire », mais ils peuvent également modifier son activité. Ceci, à l'aide de dispositifs implantés qui en stimulent des régions spécifiques avec des courants électriques. Les objectifs sont aussi divers qu'ambitieux: traiter des maladies comme la dépression ou la maladie de Parkinson, améliorer la mémoire, ou même… redonner la parole à des personnes qui l'ont perdue, notamment suite à un AVC, en décodant ce qu'elles veulent dire. Cette dernière décennie, le développement de ces implants cérébraux s'est accéléré de façon vertigineuse. Désormais, les chercheurs s'attellent à une nouvelle tâche: connecter le cerveau à des machines situées à l'extérieur du corps. Ces interfaces cerveau-machine, actuellement en phase de test, visent à redonner de la mobilité à des personnes paralysées en leur permettant de contrôler par l'esprit des fauteuils roulants ou des prothèses. L'exemple le plus abouti a été mis au point à Grenoble par des scientifiques du centre de recherches Clinatec. Grâce à leur implant, qui décrypte l'activité du cortex moteur, un patient tétraplégique a réussi en 2019 à remarcher en « conduisant » par l'esprit un exosquelette.

Quatre ans plus tard, ce même implant a permis un nouvel exploit: une personne paralysée a pu contrôler elle-même ses membres. Au lieu de connecter le cerveau avec une machine extérieure au corps, il envoie les « ordres » de l'utilisateur à un deuxième implant, localisé sur sa moelle épinière. Ce deuxième dispositif transforme ces messages en stimuli électriques qui réactivent les nerfs contrôlant les bras ou les jambes, redonnant de la mobilité à des personnes paralysées à cause d'un traumatisme de la colonne vertébrale.

Et les avancées dans le domaine promettent de se multiplier, avec un grand nombre d'implants en cours d'étude. Le plus connu est sans doute celui conçu par Neuralink, l'entreprise du milliardaire Elon Musk. Il possède dix fois plus d'électrodes que celles utilisées jusqu'à présent, ce qui pourrait rendre la connexion cerveau-machine plus rapide et précise. Il n'a pas encore été testé chez les humains, mais le recrutement pour le premier essai clinique est en cours. Ses capacités réelles devraient donc bientôt être connues. Sachant que, selon Musk, l'objectif à long terme est de connecter cerveau et intelligence artificielle. Une possibilité très lointaine, selon les experts du domaine… mais moins improbable qu'il y a dix ans.

NICOLAS GUTIERREZ C.

FLORENCE LEVILLAIN / SIGNATURES

SOMMEIL

Chaque nuit, notre cerveau trie ses déchets

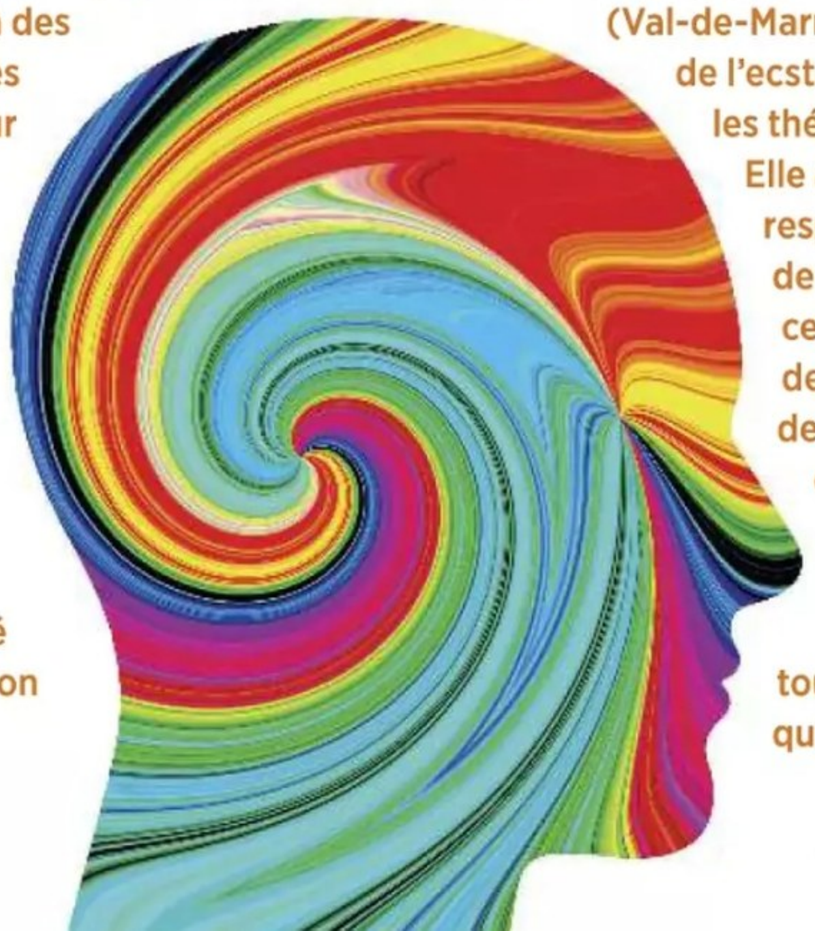
Pourquoi passons-nous un tiers de notre vie à dormir ? De nombreuses études pointent l'impact du sommeil sur l'apprentissage et la mémorisation. Mais une autre fonction vitale du sommeil, l'élimination des déchets du cerveau, a été découverte en 2013 par l'équipe de Maiken Nedergaard, neuroscientifique des universités de Rochester (États-Unis) et de Copenhague (Danemark). Toutes les cellules de notre corps produisent en effet des déchets dont l'accumulation est toxique. Celles de notre cerveau ne font pas exception. Parmi ces dépôts figurent notamment les protéines bêta-amyloïdes, dont l'agrégation est l'une des caractéristiques de la maladie d'Alzheimer. Ailleurs dans le corps, un système très efficace, le réseau lymphatique, draine les déchets des cellules vers les ganglions lymphatiques et le système veineux. Mais le cerveau est dépourvu de tels vaisseaux. Maiken Nedergaard a d'abord démontré l'existence d'un réseau de nettoyage propre au cerveau, le système glymphatique, ainsi nommé car il est activé via des cellules autres que les neurones, les cellules gliales. Ce système permet au liquide cérébrospinal, produit dans des ventricules à la base du cerveau, de pénétrer dans le cortex – où il alimente le liquide interstitiel qui baigne les neurones – et d'en sortir pour en évacuer les déchets. L'équipe de Maiken Nedergaard a ensuite découvert que le volume de l'espace interstitiel augmente de 60 % pendant le sommeil, facilitant l'écoulement du liquide. Autrement dit, le sommeil permet d'éliminer massivement les déchets dus à l'activité des neurones. Cette découverte soulève l'espoir de trouver des traitements pour des maladies neuro-dégénératives comme celle d'Alzheimer, en agissant sur les troubles du sommeil. Selon de récents travaux, traiter l'apnée du sommeil repousserait ainsi de dix ans la survenue de la maladie. Et c'est pendant le sommeil lent profond que le système glymphatique serait le plus efficace.

MARIE-LAURE THÉODULE

PSYCHIATRIE

MÉDECINE PSYCHÉDÉLIQUE : DES ESSAIS STUPÉFIANTS

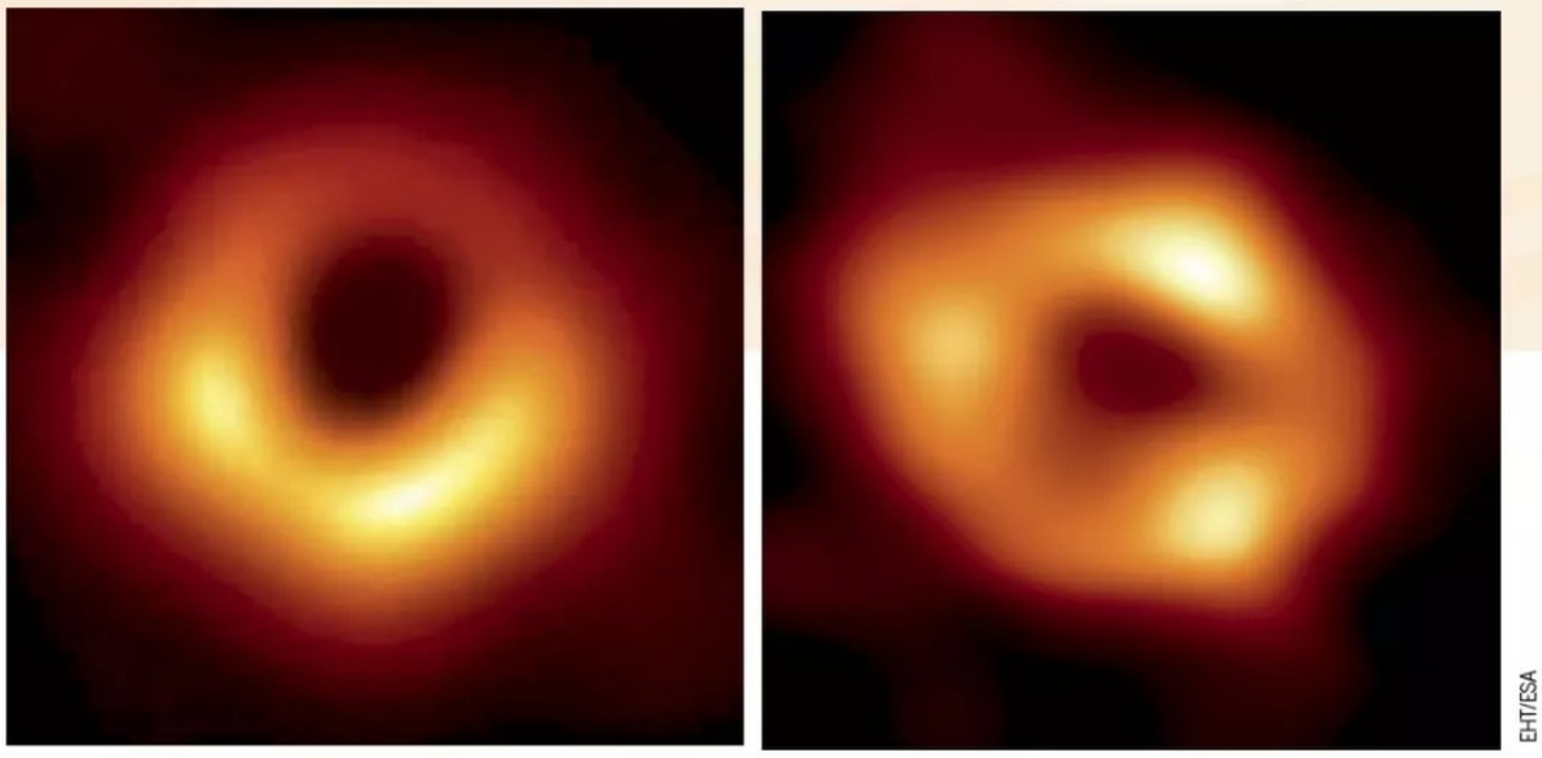
LSD, psilocybine, MDMA… les psychédéliques reviennent en force comme remèdes possibles aux maladies de l'esprit. Les effets négatifs de ces substances (hallucinations visuelles, perte de conscience de soi) ont longtemps jeté la suspicion sur leur éventuel usage à des fins médicales. Mais de nombreuses études démontrent aujourd'hui leur efficacité dans le cadre de thérapies encadrées par un suivi psychologique. Ainsi, la psilocybine (extraite de champignons hallucinogènes) est parvenue à diminuer l'état anxieux de patients atteints de cancer dans une expérience de 2016. Et en 2022, le psychiatre britannique Guy Goodwin a prouvé qu'elle vient à bout d'une dépression résistante chez 40 % des patients testés. La même année, une équipe américaine a expérimenté avec succès l'effet de la substance pour réduire l'addiction à l'alcool. Le LSD va être évalué dans le même but par une équipe française de l'hôpital Henri-Mondor à Créteil (Val-de-Marne). Quant à la MDMA, substance active de l'ecstasy, elle pourrait bientôt être utilisée dans les thérapies de stress post-traumatique. Elle aiderait les victimes, qui se sentent responsables de l'événement, à se défaire de leur sentiment de culpabilité. On sait que ces psychédéliques stimulent la production de sérotonine, neurotransmetteur régulateur de l'humeur. Récemment, on a découvert qu'ils favorisent la croissance des connexions neuronales, qui diminuent chez les personnes dépressives ou en proie à un stress chronique. Reste toutefois à contrer leurs effets négatifs pour qu'ils puissent être utilisés en routine. **M.-L. T.**



ALAMY/PHOTO12

JEUX

PAGES RÉALISÉES PAR KAMIL FADEL ET JACQUES-OLIVIER BARUCH



EHT/ESA

1 ASTROPHYSIQUE

▲ Ces deux documents montrent la toute première photo d'un trou noir, M87*, obtenue en 2019 (à gauche)… et le même trou noir vu par le James Webb Space Telescope trois ans plus tard (à droite).

☐ Vrai ☐ Faux

2 MATHS

Trouvé par un « amateur » en 2023, le « chapeau d'Einstein » est la solution d'un problème mathématique réputé insoluble.

☐ Vrai ☐ Faux

3 ASTROPHYSIQUE

En 2014, la mission Rosetta a permis à un instrument de se poser sur :

a. La comète Tchouri
b. L'astéroïde Ryugu
c. La planète Mars

4 ASTROPHYSIQUE

En 2018, les astronomes décèlent la présence d'un lac d'eau sur Mars.

☐ Vrai ☐ Faux

5 PHYSIQUE

Depuis 2019, le kilogramme n'est plus défini par un étalon. La nouvelle définition s'appuie sur :

a. La constante de Planck
b. Le nombre d'Avogadro et des atomes de silicium
c. Le nombre d'Avogadro et des atomes de carbone

6 PHYSIQUE

Le record de distance de téléportation quantique a été réalisé en 2017 sur 1400 kilomètres entre les universités de Vienne et Oxford.

☐ Vrai ☐ Faux

7 IA

En 2016, l'IA AlphaGo a battu le n° 2 mondial de go.

a. Il y a eu une seule partie
b. Il y en a eu 5, l'IA a remporté les 5
c. Il y en a eu 5, l'IA en a remporté 4

CHINE NOUVELLE/SIPA/

8 PALÉONTOLOGIE

◀ Ce petit os de 2 centimètres…

a. Appartient à une espèce de lémurien découverte en 2017 et qu'on croyait disparue
b. Appartient à une nouvelle espèce du genre *Homo* identifiée en 2019
c. Est probablement un os de la main de Descartes, retrouvé en 2018

Solutions page 82

9 ENVIRONNEMENT

Il a été démontré en 2021 que la forêt amazonienne absorbe bien plus de gaz à effet de serre qu'elle n'en rejette.

☐ Vrai ☐ Faux

10 BIOLOGIE

En 2021, des embryons chimères homme-singe ont été cultivés par une équipe française.

☐ Vrai ☐ Faux

11 ARCHÉOLOGIE

En 2017, une immense cavité, le Big Void, est découverte dans la pyramide de Khéops grâce à une technique d'imagerie mettant en jeu :

- a Des infrasons
- b Des particules cosmiques
- c Des ondes térahertz

12 CHIMIE

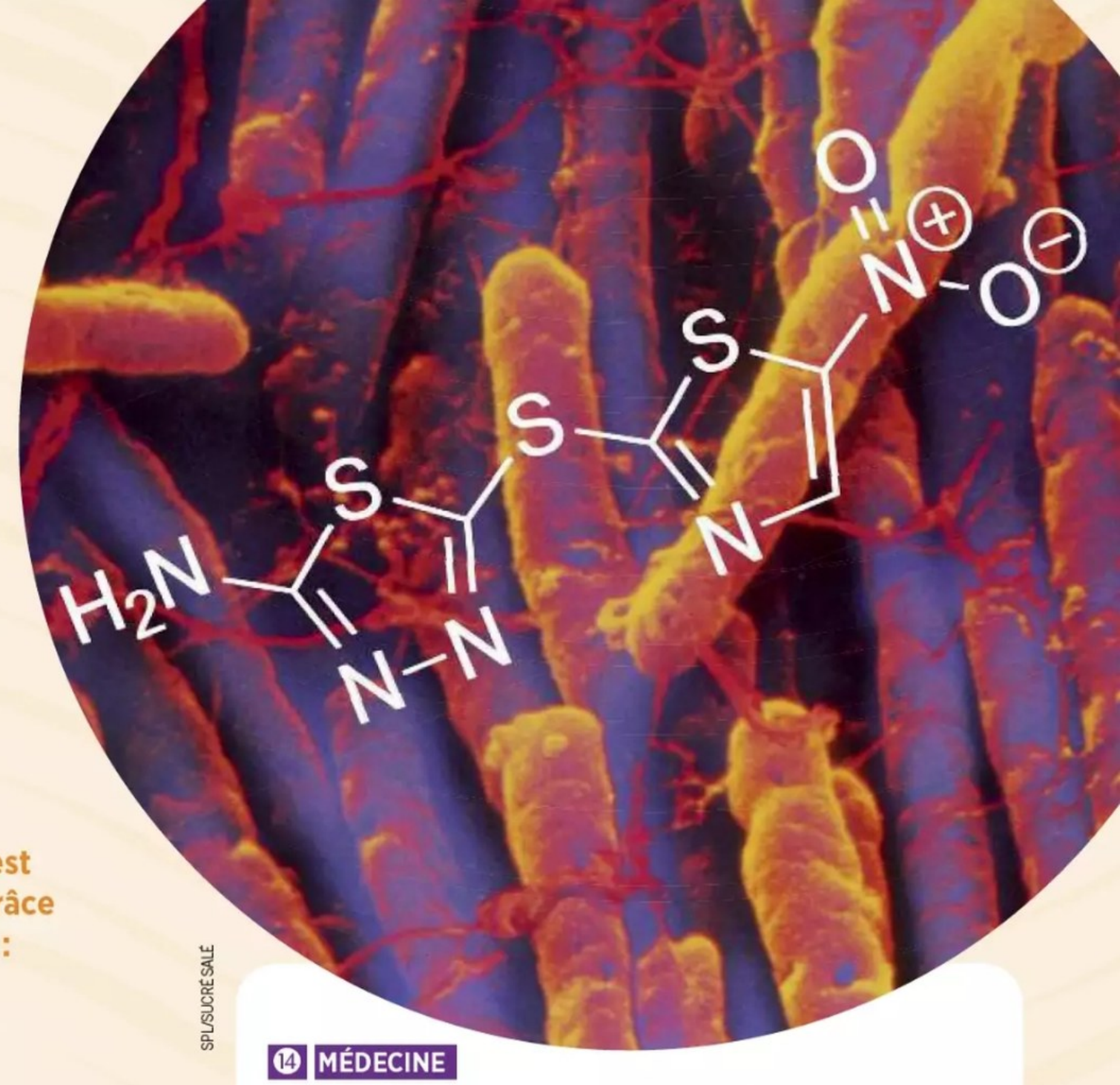
En 2016, des scientifiques ont découvert une bactérie mangeuse de plastique.

☐ Vrai ☐ Faux

13 CHIMIE

Le prix Nobel de chimie 2020, décerné à Emmanuelle Charpentier et Jennifer Doudna, est relatif à :

- a Un biocarburant universel à base de lisier de porc
- b Un outil de génie génétique
- c Une méthode ralentissant le vieillissement

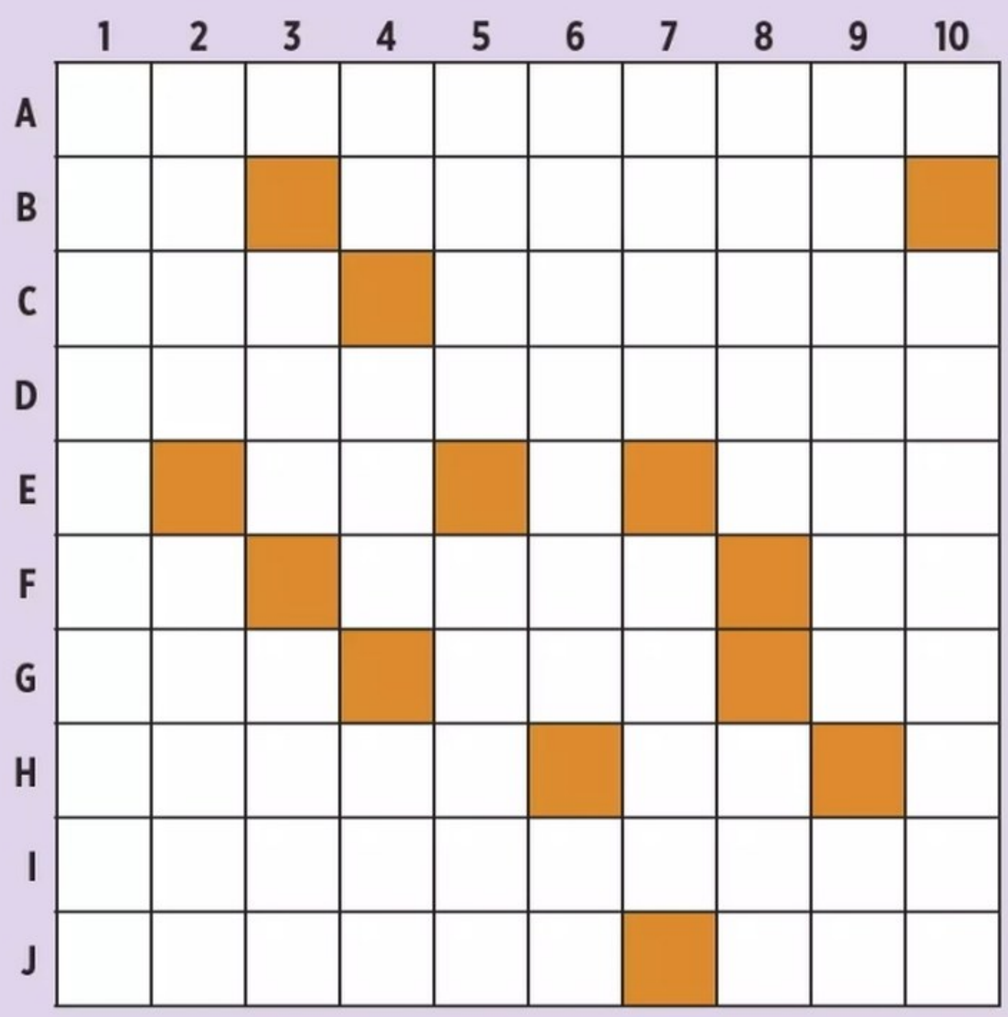


SPL/SUCRÉ SALÉ

14 MÉDECINE

▲ Un nouvel antibiotique à large spectre, l'halicine, a été découvert en 2019. Son nom a été choisi en référence à :

- a L'ordinateur intelligent HAL dans *2001 : L'Odyssée de l'espace,* cet antibiotique ayant été conçu par une IA
- b La bactérie halophile (vivant en milieu très salé) qui le produit
- c L'université de Halifax (Canada), où il a été mis au point



Mots croisés

HORIZONTALEMENT

A N'ont pas été connus des dinosaures.
B Quelques pas en Chine. Photos projetées.
C Dix sur dix. Symbole de Hollande.
D Mettre en orbite.
E Conjonction. Sémioticien italien.
F Destinée à nous remplacer ? Mèches rebelles. Venu d'ailleurs.
G Pronom relatif. Tenta. Note.
H Comme une charge. Pronom.
I Un sujet aux zoonoses ?
J Adeptes aveugles. Encore une fois.

VERTICALEMENT

1 Le septième continent.
2 Nicha. L'enfer, c'est lui.
3 La plus longue des saisons au nord, la plus courte au sud. « ... c'est fini ! »
4 Wood ou Sheeran dans l'intimité. Est passé. Provoque un trip.
5 Loti mal loti. En vers.
6 Comme le coq. Arsenic sans vieilles dentelles.
7 Plié mal plié. Peut dans le Nord.
8 Ne la cherchez pas. Vit dans les « Indispensables ».
9 Ne brisez pas leur barrière. Au sol ou dans l'air.
10 Mettre en rose.

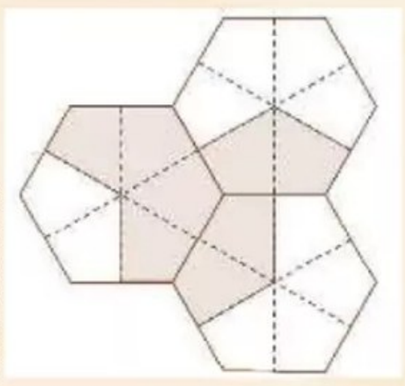
SOLUTIONS

1 – ASTROPHYSIQUE

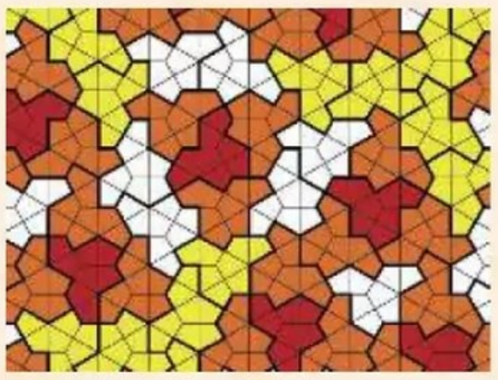
Faux. Si l'image de gauche est bien celle de M87*, révélée grâce à l'Event Horizon Telescope (EHT), à droite, il s'agit de Sagittarius A*, le trou noir supermassif – 4 millions de fois la masse de notre soleil – situé au centre de la Voie lactée, et dont l'image a été produite, elle aussi, par l'EHT, en 2022.

2 – MATHS

Vrai. Est-il possible de carreler une surface avec des carreaux identiques sans que le résultat final révèle une quelconque périodicité ? C'est le problème « *ein Stein* » (une pierre, en allemand). La solution proposée, un carreau ayant 13 côtés, est issue de trois hexagones.



WIKIMEDIA COMMONS



3 – ASTROPHYSIQUE

a Grâce au robot Philae, envoyé sur la comète par la sonde Rosetta qui orbitait autour d'elle, on sait notamment que le noyau de Tchouri comporte 40 % de matière organique. L'astéroïde Ryugu a fait l'objet d'une mission similaire, Hayabusa 2, en 2018-2019.

4 – ASTROPHYSIQUE

Vrai. En s'appuyant notamment sur des mesures radar effectuées par des sondes, les astronomes pensent qu'un lac d'eau liquide de vingt kilomètres de large existe à 1500 mètres sous la calotte polaire sud. Mars possède donc une activité géothermique.

5 – PHYSIQUE

a La constante de Planck est fixée précisément à $6{,}626\ 070\ 15.10^{-34}$ kg.m²/s. La seconde étant définie par la fréquence d'un saut entre deux niveaux d'énergie de l'atome de césium, et le mètre par la vitesse de la lumière dans le vide (299 792 458 m/s), cela permet de définir le kilogramme.

6 – PHYSIQUE

Faux. Ce record de 1400 kilomètres a été établi par une équipe chinoise entre le sol et le satellite Mozi de la mission Quess. Il s'agissait d'un test de communication chiffrée et inviolable. La téléportation est un transfert instantané de l'état quantique d'une particule vers une autre.

7 – IA

c Le Sud-Coréen Lee Sedol a remporté la quatrième partie en décelant une faille du logiciel. L'année suivante, une version améliorée du programme ne laisse aucune chance au champion du monde, le Chinois Ke Jie, terrassé trois manches à zéro.

8 – PALÉONTOLOGIE

b À partir de 2007, plusieurs fossiles appartenant à trois individus ayant vécu il y a environ 50 000 ans ont été découverts sur l'île de Luçon aux Philippines, par une équipe comprenant des chercheurs français. Leur appartenance au genre *Homo* a été établie en 2019 et l'espèce baptisée *Homo luzonensis.*

9 – ENVIRONNEMENT

Faux. Sécheresses, élévation des températures, déforestation, incendies, agriculture et élevage ont inversé le bilan, si bien que la forêt émet davantage de ces gaz (méthane, oxydes d'azote…) qu'elle n'en absorbe. Pour certaines zones, l'inversion concerne même le CO_2.

10 – BIOLOGIE

Vrai. Des cellules souches humaines ont été insérées dans des embryons de macaques et cultivées durant trois jours par des chercheurs de l'Inserm à Lyon. Une équipe sino-américaine a fait de même pendant dix-neuf jours. L'objectif est de pouvoir faire produire des organes humains par des animaux.

11 – ARCHÉOLOGIE

b La mission ScanPyramids s'était fixé l'objectif de percer le mystère des pyramides en utilisant des techniques de pointe non destructives, notamment la radiographie par muons, des particules cosmiques identiques aux électrons mais 200 fois plus massives, capables de traverser des roches de grande épaisseur.

12 – CHIMIE

Vrai. Cette année-là, une équipe japonaise décrit dans la revue *Science* une bactérie capable de se nourrir de déchets plastiques. Nommée *Ideonella sakaiensis,* celle-ci produit deux enzymes capables de dégrader les chaînes de molécules composant le polyéthylène téréphtalate (ou PET) en éléments assimilables.

13 – CHIMIE

b Le système CRISPR-Cas9 est un outil d'édition génomique permettant de modifier des séquences d'ADN en coupant, insérant, collant… comme un éditeur de texte. C'est à l'origine un système de défense immunitaire employé par des bactéries contre des virus.

14 – MÉDECINE

a À l'origine, la molécule SU-3327 était prévue pour le traitement du diabète. Mais en 2019, une IA de type *machine learning*, à laquelle les chercheurs ont présenté 2 500 molécules capables de tuer la bactérie *Escherichia coli,* découvre qu'elle pourrait agir comme un antibiotique puissant capable d'éradiquer des bactéries résistantes aux traitements traditionnels.

Mots croisés

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	P	A	L	E	O	G	E	N	E	S
B	L	I	■	D	I	A	P	O	S	■
C	A	R	E	■	T	U	L	I	P	E
D	S	A	T	E	L	L	I	S	E	R
E	T	■	E	T	■	O	■	E	C	O
F	I	A	■	E	P	I	S	■	E	T
G	Q	U	I	■	O	S	A	■	S	I
H	U	T	I	L	E	■	I	L	■	S
I	E	R	I	S	M	A	T	U	R	E
J	S	E	I	D	E	S	■	T	E	R

PUBLICITÉ

Fonctionnement du cerveau

Mémoriser, raisonner, anticiper, planifier, comprendre… les capacités du cerveau sont illimitées.

Au rythme du cerveau

Le cerveau émet en permanence des ondes dont la fréquence dépend de son activité. Eveil, sommeil, phase intense de réflexion : pour chaque état cérébral, l'activité neuronale est caractérisée par un type d'onde.

Ondes alpha, bêta, gamma : leur rôle est complexe et leur émission par le cerveau dépend de nombreux facteurs, comme l'état psychologique ou encore l'alimentation.

Des études récentes ont par exemple montré le lien étonnant entre Thé vert et ondes alpha. Les feuilles de Thé vert contiennent naturellement une substance appelée L-théanine. Malgré son nom, elle n'a aucun lien avec la théine et ne provoque aucune excitation, bien au contraire. La L-théanine régule la production d'ondes alpha : en situation d'effort intellectuel prolongé, elle est capable de diminuer leur production par le cerveau, ce qui favorise la mémorisation et la concentration. À l'inverse, si le cerveau se trouve en phase d'endormissement, elle stimule leur émission, d'où un effet relaxant propice au sommeil.

Théorie des signatures

La Théorie des Signatures était une méthode d'observation dans l'Antiquité, selon laquelle l'aspect des plantes était une indication de leurs bienfaits pour le corps. La science moderne a depuis confirmé l'efficacité de certaines plantes sur la partie du corps à laquelle elles ressemblent. Ainsi débarrassée de sa coque, la Noix ressemble fortement à un cerveau. Elle est riche en Omegas et en antioxydants, et plusieurs études ont montré ses bienfaits sur la mémoire.

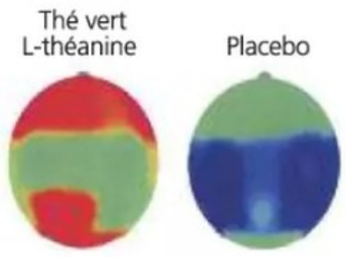
Indispensable irrigation

Le cerveau est incapable de constituer des réserves, et doit donc être alimenté en permanence en glucose. Celui-ci est apporté grâce à un vaste réseau de capillaires, de petits vaisseaux sanguins qui permettent d'irriguer efficacement l'ensemble du cerveau. Leurs fines parois laissent passer le glucose mais aussi l'oxygène indispensable au bon fonctionnement du cerveau. En effet, quelques minutes seulement sans oxygène y entraîne des lésions irréversibles. Là encore, l'alimentation et le mode de vie en général jouent un rôle primordial. La consommation d'aliments riches en antioxydants qui protègent les capillaires, et plus spécifiquement en polyphénols, influence directement le fonctionnement cérébral. Les recherches convergent notamment sur le Pin maritime, dont l'écorce renferme de grandes quantités de proanthocyanidines ou OPC, des polyphénols capables de stimuler la microcirculation sanguine dans les capillaires.

B comme bénéfiques

Le cerveau utilise aussi une multitude de vitamines et minéraux pour fonctionner. Un apport suffisant en vitamines B est particulièrement bénéfique pour maintenir des fonctions cognitives normales (mémoire, concentration, attention). La vitamine B5 par exemple est essentielle à la production de neurotransmetteurs, des substances chimiques qui permettent aux signaux électriques de passer d'un neurone à l'autre pour faire circuler l'information.

Le cerveau passé au scanner



L'activité cérébrale peut être observée grâce au scanner qui met en évidence les zones activées en fonction de l'état dans lequel se trouve le cerveau. La consommation de L-théanine (en rouge) active les zones de la mémoire et de la concentration. Sans L-théanine, ces zones restent inactives (en bleu). Les nombreux travaux de recherche effectués sur le fonctionnement du cerveau ont permis de mettre au point des solutions pour améliorer les fonctions cognitives et les performances intellectuelles. Le laboratoire de recherche végétale New Nordic a mis au point une formule complètement naturelle à base de plantes et vitamines. Baptisée **Cerveau Clair**, elle contient des extraits concentrés de Thé vert, de Noix, de Pin maritime et de Grenade, associés à des vitamines et de l'Iode pour optimiser les performances cérébrales. Ces actifs sont capables d'atteindre le cerveau en quelques heures et sont efficaces sur le long terme. Ils sont donc indiqués pour stimuler les capacités intellectuelles, la concentration et la mémoire, notamment en période de révisions ou d'examens, mais aussi pendant des programmes de plusieurs mois. Les actifs de **Cerveau Clair** atteignent rapidement le cerveau, pour une efficacité en moins d'une heure. Réservé aux adultes de plus de 15 ans.

Des conseils ?

Les experts New Nordic vous répondent au **01 85 41 32 48** ou sur **www.vitalco.com**

Disponible en pharmacie

Cerveau Clair 60 cp est disponible grâce au code **ACL 295 18 63**

tech&fest

CÉLÉBRER LE MEILLEUR DE L'INNOVATION, ENSEMBLE !

150 EXPOSANTS - 4 SCÈNES - 17 000M²

Votre billet gratuit avec le code

SCIENCES

1ÈRE ÉDITION

1-2 FÉVRIER 2024

ALPEXPO GRENOBLE

PARMI 100 SPEAKERS, VOUS RENCONTREREZ NOTAMMENT

REJOIGNEZ DÈS MAINTENANT LA COMMUNAUTÉ DES ENTREPRISES LES PLUS INNOVANTES DE FRANCE !

www.tech-fest.fr